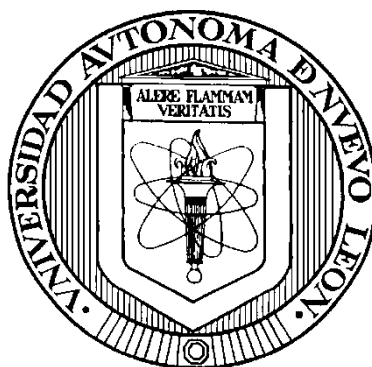


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**“EFECTO DE LAS CARGAS VIVAS EN LOS DESPLAZAMIENTOS, EN  
PUENTES CURVOS DE ACERO”**

**Por**

**MARTÍN CANTÚ DÍAZ**

**Como requisito parcial para obtener el Grado de  
Doctor en Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras**

Octubre, 2018



**UANL**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**FIC**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Oficio: SEP-491-2018

**ING. LÁZARO VARGAS GUERRA**

Director del Departamento de Escolar y de  
Archivo de la UANL  
PRESENTE.-

Estimado Ing. Vargas:

Por este conducto me permito comunicarle que el **M.C. Martín Cantú Díaz**, pasante del **Doctorado en Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras**, ha terminado su tesis de investigación **"Efecto de las cargas vivas en los desplazamientos, en puentes curvos de acero"**, para lo cual, el M.C. Cantú Díaz ha dedicado seis años y medio en desarrollo experimental, análisis de resultados, redacción y correcciones de la tesis, lo anterior comprendido en los semestres Agosto-Diciembre de 2010 a agosto-diciembre de 2016.

Sin más por el momento, quedo a sus apreciables órdenes para cualquier duda o aclaración.

ATENTAMENTE,  
**"ALERE FLAMAM VERITATIS"**  
Cd. Universitaria a 6 de noviembre del 2018.

**DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO**  
Subdirector de Estudios de Posgrado



SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO

C.c.p. Archivo.  
Rtp.





UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL  
DR. CESAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Presente:

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de la Tesis Doctoral con título: **"Efecto de las cargas vivas en los desplazamientos en Puentes Curvos de Acero"**, que presenta el M.C. Martín Cantú Díaz, como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que la misma es **APROBADA** y que la fecha del examen de grado será el 30 de Noviembre de 2018.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente

"ALERE FLAMMAM VERITATIS"

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 17 de Septiembre de 2018

  
DR. RICARDO GONZÁLEZ ALCORTA  
Director





# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

# FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL**  
**DR. CESAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO**  
**SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Presente:

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de la Tesis Doctoral con título: **"Efecto de las cargas vivas en los desplazamientos en Puentes Curvos de Acero"**, que presenta el M.C. Martín Cantú Díaz, como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que la misma es **APROBADA** y que la fecha del examen de grado será el 30 de Noviembre de 2018.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente  
"ALERE FLAMMAM VERITATIS"  
Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 17 de Septiembre de 2018

Dr. Guillermo Villarreal Garza  
Co-Director





UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL  
DR. CESAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Presente:

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalice la revisión de la Tesis Doctoral con título: **"Efecto de las cargas vivas en los desplazamientos en Puentes Curvos de Acero"**, que presenta el M.C. Martín Cantú Díaz, como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que la misma es **APROBADA** y que la fecha del examen de grado será el 30 de Noviembre de 2018.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente

"ALERE FLAMMAM VERITATIS"

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 17 de Septiembre de 2018

*Jorge H. Chávez*

Dr. Jorge Humberto Chávez Gómez  
Evaluador





UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL  
DR. CESAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Presente:

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalice la revisión de la Tesis Doctoral con título: **"Efecto de las cargas vivas en los desplazamientos en Puentes Curvos de Acero"**, que presenta el M.C. Martín Cantú Díaz, como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que la misma es **APROBADA** y que la fecha del examen de grado será el 30 de Noviembre de 2018.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente  
"ALERE FLAMMAM VERITATIS"

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 17 de Septiembre de 2018

Dr. Román Hermosillo Mendoza  
Evaluador





# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

# FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL  
DR. CESAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Presente:

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalice la revisión de la Tesis Doctoral con título: **"Efecto de las cargas vivas en los desplazamientos en Puentes Curvos de Acero"**, que presenta el M.C. Martín Cantú Díaz, como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que la misma es **APROBADA** y que la fecha del examen de grado será el 30 de Noviembre de 2018.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente

**"ALERE FLAMMAM VERITATIS"**

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 17 de Septiembre de 2018

Dr. Adolfo Arturo Elías Chávez  
Evaluador

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo:

Primeramente a DIOS, gracias por todas las bendiciones que me ha dado.

A mis amados padres Francisco Isidoro Cantú Padilla (†) y María Luisa Díaz Carreón.

A Don Manuel (†), Doña Esther (†), Don Natalio (†) y Doña Cruz (†), mis queridos abuelos.

A mis queridos suegros, Luis Gaytán Carrillo (†) y Margarita Jasso Carranza, con toda su familia.

A Luis Francisco, Jorge Alberto (†), Fernando, Laura Nelly, Julio Cesar, Luisa Elizabeth y Liliana Ivette Cantú Díaz, mis queridos hermanos.

A mis hijos, especialmente a Patricio y Marcelo Cantú Gaytán, por su apoyo, comprensión y motivación en todo lo relacionado con este trabajo.

Finalmente, a mi amada esposa Ana Margarita Gaytán Jasso, quien me ha ayudado y apoyado siempre, dándome la motivación necesaria para la realización de este trabajo.



## **AGRADECIMIENTOS**

A la Secretaría de Obras Públicas del Municipio de Monterrey y a la Secretaría de Obras Públicas del Gobierno del Estado de Nuevo León por las facilidades y permisos para llevar a cabo el ensaye en el puente del Complejo Fundidora.

A la Constructora Maíz Mier S.A. de C.V. y al Ing. Javier Gutiérrez Cisneros por los equipos facilitados para la realización de una prueba en el puente.

Al Laboratorio de Estructuras Phil M. Ferguson de la Universidad de Texas en Austin, por su cooperación y bibliografía facilitada.

A mis colaboradores en este trabajo, Ing. Jesús Emmanuel Mendiola González, M.C. Ing. Tania Lozoya, Ing. José R. Villa, Ing. Roberto A. Martínez G. y Lic. Carlos A. Martínez G.

A mis asesores en esta tesis, Dr. Guillermo Villarreal Garza y muy especialmente al Dr. Ricardo González Alcorta, quienes me apoyaron y alentaron durante la realización de este trabajo.

Al Instituto de Ingeniería Civil, por todas las facilidades, instalaciones, materiales y equipo humano que me ayudó en la realización de los ensayos y pruebas.

Al comité evaluador de la tesis, Dr. Adolfo Arturo Elías Chávez, Dr. Román Hermosillo Mendoza y Dr. Jorge Humberto Chávez Gómez, por sus consejos, asesorías y excelentes comentarios que llevaron a enriquecer este trabajo.

A mí Alma Mater, la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, al ex-director MI Luis Manuel Aranda Maltez y al actual director Dr. Pedro L. Valdez Tamez, por el apoyo a este trabajo.

## **TABLA DE CONTENIDO**

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes.	3
1.2 Objetivos y metas.	6
1.3 Hipótesis.	7
1.4 Organización de la tesis.	8
<b>CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA DISPONIBLE</b>	<b>9</b>
2.1 Definición y diferencias entre puentes rectos y curvos.	9
2.2 Recopilación y revisión de la literatura existente acerca de los métodos de análisis de puentes curvos.	11
2.2.1. Solución exacta para vigas rectas y curvas a flexión.	11
2.2.2. Métodos de análisis de puentes curvos.	12
2.2.2.1. Métodos de análisis aproximados.	13



2.2.2.2.	Métodos de análisis más refinados.	15
<b>CAPÍTULO 3.</b>	<b>MÉTODO PROPUESTO PARA ESTIMAR LOS DESPLAZAMIENTOS EN PUENTES CURVOS DE ACERO</b>	<b>19</b>
3.1	Hipótesis y requisitos considerados en el procedimiento para estimar los desplazamientos.	20
3.2	Rigidez longitudinal de la viga.	21
3.3	Ecuación propuesta para la estimación de las deflexiones en puentes curvos de acero.	22
<b>CAPITULO 4.</b>	<b>SIMULACIÓN NUMÉRICA</b>	<b>24</b>
4.1	Método de solución utilizado en la simulación.	24
4.2	Análisis de la estructura utilizando elementos finitos, programa SAP 2000 v 14.	25
4.3	Resumen de los resultados de la simulación numérica de los doce modelos de puentes.	29
<b>CAPÍTULO 5.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO Y APLICACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO</b>	<b>30</b>
5.1	Desarrollo de los trabajos.	30
5.2	Caso en estudio.	32
5.3	Aplicación de la ecuación propuesta al caso en estudio.	37
5.4	Análisis de la estructura en estudio utilizando elementos finitos, programa SAP 2000 v 14.	40

5.5	Análisis de la estructura en estudio utilizando el entramado plano, programa STAAD Pro.	40
5.6	Resumen de los resultados de la simulación experimental de la estructura en estudio.	44
<b>CAPITULO 6. SIMULACIÓN EXPERIMENTAL</b>		<b>45</b>
6.1	Introducción.	45
6.2	Equipos Adquisidores de los datos.	46
6.3	Calibración del equipo.	49
6.4	Ubicación y colocación de las galgas extensiométricas.	54
6.4.1.	Antecedentes.	54
6.4.2.	Ubicación de galgas y LVDT en el caso en estudio.	56
6.5	Pruebas en el caso en estudio.	60
6.6	Resultados de las pruebas en el puente.	65
6.7	Resumen de los resultados de la simulación experimental.	73
<b>CAPITULO 7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>		<b>77</b>
7.1	Comparación de los resultados de la ecuación propuesta versus los resultados de la simulación numérica de las doce estructuras.	77

7.2 Comparación de los resultados de la ecuación propuesta versus los de la simulación numérica y experimental del puente en estudio.	81
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>83</b>
Conclusiones.	83
Recomendaciones.	83
Futuras investigaciones.	84
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>85</b>
 <b>APÉNDICES</b>	
Apéndice A. Proceso de la calibración de los adquisidores.	90
Apéndice B. Secuencia del ensaye en la estructura en estudio.	95
Apéndice C. Resultados de las pruebas a la estructura en estudio.	103



## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
4.3.1	Deflexiones máximas en los doce modelos de puentes analizados, usando SAP 2000.	29
6.4.2.1	Ubicación de galgas en la viga interior V-19.	57
6.4.2.2	Ubicación de galgas en la viga exterior V-20.	58
6.7.1	Esfuerzos en el alma de la viga exterior V-20.	73
6.7.2	Esfuerzos en el alma de la viga interior V-19.	74
7.1.1	Comparación de las deflexiones utilizando la ecuación propuesta 3-1 y las obtenidas por el programa SAP 2000.	78
7.2	Comparación de las deflexiones al centro del claro, debidas al vehículo del ensaye, versus la ecuación 3-1, SAP 2000 y STAAD Pro.	82

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
4.2.1	Modelo tridimensional de análisis.	26
4.2.2	Modelo de análisis con trayectoria del vehículo.	27
4.2.3	Tren de carga IMT 66.5 usado en los análisis.	27
4.2.4	Línea de influencia del modelo de análisis.	28
4.2.5	Puente deformado por la acción del tren de carga.	28
5.2.1	Vista general del puente en estudio.	32
5.2.2	Vista superior del puente en estudio.	33
5.2.3	Viga típica del puente en estudio.	34
5.2.4	Vigas principales y diafragmas del puente en estudio.	35
5.2.5	Planta del claro del puente en estudio.	36
5.2.6	Sección transversal del puente en estudio.	36
5.4.1	Tren de carga del camión usado en el ensaye.	40
5.5.1	Modelo del puente usando el método del entramado plano.	41
5.5.2	Vista en planta del modelo del puente, usando el método del entramado plano.	41
5.5.3	Modelo del entramado plano, con el tren de cargas vivas del ensaye.	42
5.5.4	Momentos flexionantes en el eje principal de las vigas con el tren de cargas vivas del ensaye.	43

5.5.5	Esfuerzos en el eje principal de las vigas, con el tren de cargas del ensaye.	43
5.5.6	Deflexiones en el eje z, debidas a la carga del ensaye.	44
6.2.1	Adquisidor de datos de 2 canales, Modelo P3 versión 1.02 de Vishay Micro Measurements.	47
6.2.2	Adquisidor de datos de 16 canales, de National Instruments SCXI 1600.	47
6.2.3	Galga extensiométrica (strain gage).	48
6.2.4	Comprobación de lecturas en ambos adquisidores.	49
6.3.1	Esquema de calibración del equipo SCXI 1600.	50
6.3.2	Preparación de los <i>strain gage</i> .	51
6.3.3	Conexión del <i>strain gage</i> a la tarjeta del adquisidor SCXI 1600.	52
6.3.4	Conexión del <i>strain gage</i> a la probeta de acero.	52
6.3.5	Prueba de la probeta en la maquina universal.	53
6.3.6	Calibración del LVDT.	54
6.4.2.1	Ubicación de los <i>strain gage</i> en patines de las vigas V-19 y V-20.	57
6.4.2.2	Ubicación de los <i>strain gage</i> en el alma de las vigas V-19 y V-20.	58
6.4.2.3	Ubicación de los <i>strain gage</i> en la sección transversal de la viga V-20.	59
6.4.2.4	Ubicación de <i>strain gage</i> en la sección transversal de la viga V-19.	59
6.5.1	Instalación de los <i>strain gages</i> en las vigas de prueba.	60
6.5.2	Instalación del LVDT en el campo.	61
6.5.3	Conexión de los <i>strain gages</i> con los Adquisidores de	62



datos.

6.5.4	Prueba de conexión de los <i>strain gages</i> con los Adquisidores de datos.	62
6.5.5	Prueba con el camión del ensaye.	63
6.5.6	Verificando la trayectoria del camión durante el ensaye.	64
6.6.1	Deflexión al centro del claro-medida en la viga exterior V-20.	65
6.6.2	Resultados de la galga No 2, colocada sobre el apoyo en la parte inferior del alma de la viga exterior V-20.	66
6.6.3	Resultados de la galga No 3, colocada sobre el apoyo a la mitad de la altura del alma de la viga exterior V-20.	67
6.6.4	Resultados de la galga No 7, colocada a un lado del diafragma, a la mitad de la altura del alma de la viga exterior V-20.	67
6.6.5	Resultados de la galga No 11, colocada al centro del claro y a la mitad de la altura del alma de la viga exterior V-20.	68
6.6.6	Resultados de la galga No 14, colocada al centro del claro en el patin de la viga exterior V-20, lado exterior de la curva.	69
6.6.7	Resultados de la galga No 1, colocada sobre el apoyo en la parte inferior del alma de la viga interior V-19.	70
6.6.8	Resultados de la galga No 4, colocada sobre el apoyo en la mitad de la altura del alma de la viga interior V-19.	70
6.6.9	Resultados de la galga No 5, colocada al centro del claro a la mitad de la altura del alma de la viga interior V-19.	71
6.6.10	Resultados de la galga No 12, colocada al centro del claro en la parte inferior del alma de la viga interior V-19.	72
6.6.11	Resultados de la galga No 10, colocada al centro del claro en el patin de la viga interior V-19, lado interior de	73

la curva.

6.7.1	Deformaciones del alma en la viga exterior V-20, a lo largo de su eje.	74
6.7.2	Deformaciones del alma en la viga interior V-19, a lo largo de su eje.	75
6.7.3	Intervalo de deflexiones al centro del claro, medidas en la viga exterior V-20.	76
7.1.1	Deflexiones para puentes de 20 m de claro y con diferentes radios, calculada usando la ecuación propuesta 3-1 versus SAP 2000.	79
7.1.2	Deflexiones para puentes de 25 m de claro y con diferentes radios, calculada usando la ecuación propuesta 3-1 versus SAP 2000.	80
7.1.3	Deflexiones para puentes de 30 m de claro y con diferentes radios, calculada usando la ecuación propuesta 3-1 versus SAP 2000.	80
7.1.4	Deflexiones en puentes de distintos claros y radios utilizando la ecuación propuesta 3-1, versus las obtenidas por el programa SAP 2000.	81
A.1	Preparación de <i>strain gages</i> en laboratorio	91
A.2	Conexión de <i>strain gages</i> a la tarjeta del adquisidor	91
A.3	Esquema de calibración del adquisidor.	91
A.4	Toma de lecturas de inicio para la calibración.	91
A.5	Diagrama de las conexiones de los deformímetros.	92
A.6	Calibración usando cilindro de concreto.	92
A.7	Calibración con la probeta de acero.	92
A.8	Calibración usando vigas de acero.	92

A.9	Fijación del dispositivo para la aplicación de carga.	93
A.10	Toma de lecturas durante la calibración usando vigas.	93
A.11	Conexión del LVDT al adquisidor para su calibración.	93
A.12	Verificación de niveles en marco para calibración del LVDT.	93
A.13	Calibración del LVDT.	94
A.14	Toma de lecturas durante la calibración del LVDT.	94
A.15	Toma de lecturas en la maquina universal.	94
A.16	Registro de lecturas de la maquina universal.	94
B.1	Revisión de conexiones en deformímetros.	96
B.2	Remoción de los deformímetros ya preparados.	96
B.3	Se remueve la pintura con un pequeño pulidor.	96
B.4	Se remueve la pintura hasta llegar a la matriz.	96
B.5	Remover pintura con solvente.	97
B.6	Se coloca el adhesivo.	97
B.7	Se fija el deformímetro en la viga.	97
B.8	Se coloca cinta de protección y se fijan los cables.	97
B.9	Fijación de cables del deformímetro.	98
B.10	Fijación de deformímetro y colocación de LVDT.	98
B.11	Deformímetros y LVDT al centro de la viga V-20.	98
B.12	Instalación de LVDT en la viga V-20.	98
B.13	Conexión de deformímetros y LVDT al adquisidor.	99
B.14	Trazo de trayectoria a seguir por el camión.	99



B.15	Trayectoria a seguir por el camión durante el ensaye.	99
B.16	Toma de lecturas sin carga en el puente.	99
B.17	Acomodar el camión para seguir una trayectoria.	100
B.18	Camión siguiendo la trayectoria indicada.	100
B.19	Toma de lecturas durante el ensaye.	100
B.20	Toma de lecturas con ambos adquisidores.	100
B.21	Toma de lecturas con adquisidor VISHAY Modelo P-3.	101
B.22	Tomando lecturas durante el ensaye.	101
B.23	Toma de lecturas con adquisidor SCXI 1600.	101
B.24	Tomando las medidas del camión usado en la prueba.	101
B.25	Obtención de datos del camión del ensaye.	102
B.26	Bascula pública para el pesaje del camión del ensaye.	102
B.27	Pesaje del camión usado en el ensaye.	102
B.28	Pesaje del eje delantero del camión del ensaye.	102
C.1	Deflexión al centro del claro-medida, en la viga exterior V-20.	104
C.2	Resultados de la galga No 2, colocada sobre el apoyo en la parte inferior del alma de la viga exterior V-20.	105
C.3	Resultados de la galga No 3, colocada sobre el apoyo en la mitad de la altura del alma de la viga exterior V-20.	106
C.4	Resultados de la galga No 7, colocada a un lado del diafragma a la mitad de la altura del alma de la viga exterior V-20.	107
C.5	Resultados de la galga No 11, colocada al centro del claro y a la mitad de la altura del alma de la viga exterior	

	V-20.	108
C.6	Resultados de la galga No 14, colocada al centro del claro en el patin de la viga exterior V-20, lado exterior de la curva	109
C.7	Resultados de la galga No 1, colocada sobre el apoyo en la parte inferior del alma de la viga interior V-19.	110
C.8	Resultados de la galga No 4, colocada sobre el apoyo en la mitad de la altura del alma de la viga interior V-19.	111
C.9	Resultados de la galga No 5, colocada al centro del claro en la mitad de la altura del alma de la viga interior V-19	112
C.10	Resultados de la galga No 12, colocada al centro del claro en la parte inferior del alma de la viga interior V-19.	113
C.11	Resultados de la galga No 10, colocada al centro del claro en el patin de la viga interior V-19, lado interior de la curva.	114

## NOMENCLATURA

$A_c$	= Área de la sección transversal de la viga de acero.
$b_f$	= Ancho del patin de la viga de acero.
$e_g$	= Distancia entre los centros de gravedad de la viga y de la losa.
$E_b$	= Módulo de elasticidad del material usado en la viga, en este caso del acero estructural $E_s$ .
$E_d$	= Módulo de elasticidad del material usado en la losa, en este caso del concreto reforzado $E_c$ .
$E_s$	= Módulo de elasticidad del acero estructural.
$E_c$	= Módulo de elasticidad del concreto reforzado.
$F'_c$	= Resistencia del concreto a la compresión a los 28 días.
$f_\ell$	= Esfuerzo de flexión lateral del patin, articulo 6.10.1.6. de [1].
$f_{bu}$	= Esfuerzo de compresión mayor en el patin en consideración,



que se presenta en cualquier punto de toda la longitud no arriostrada, calculado sin considerar la flexión lateral del patín artículo 6.10.1.6. de [1].

- I = Momento de inercia de la viga de acero con respecto al eje mayor.
- $K_g$  = Parámetro de rigidez longitudinal, artículo 4.6.2.2.1. de [1].
- $L_b$  = Longitud no arriostrada, espaciamiento entre diafragmas o marcos con diagonales usados como diafragmas, artículo C6.7.4.2. de [1].
- $L_r$  = Limite de la longitud no arriostrada, para lograr el inicio de la fluencia nominal en cualquiera de los patines que tenga flexión uniforme con la consideración de esfuerzos residuales a compresión en el patin, artículo 6.7.4.2. de [1].
- $L_{sc}$  = Longitud entre apoyos considerada en la dirección de su eje longitudinal, medida sobre el eje central de la viga.
- LVDT = Transformador diferencial de variación lineal, es un tipo de transductor eléctrico utilizado para medir desplazamientos lineales.
- n = Relación de módulos de elasticidad =  $E_B/E_D$  artículo 4.6.2.2.1. de [1].
- P = Carga concentrada.
- R = Radio de curvatura del elemento.
- $r_\sigma$  = Relación de esfuerzos deseado en una viga tipo I curva horizontalmente.
- V- = Viga número.
- $\Delta$  = Deflexión al centro del claro.
- $\alpha$  = Coeficiente propuesto en función del radio de curvatura y el claro de la estructura.

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUCCIÓN**

El diseño de los puentes curvos con vigas de acero requiere una comprensión suficiente de su comportamiento, cuando éstos son sometidos a la acción de las cargas vivas en particular. Existen actualmente aspectos importantes pendientes de estudiar en este tipo de puentes. Éstos afectan los desplazamientos y las deformaciones de las vigas del puente, como son: la ubicación de las cargas vivas, los radios de curvatura y la distribución de las cargas vivas en la sección transversal del puente, por citar los más importantes.

El propósito de esta investigación es estudiar los efectos de las cargas vivas en los desplazamientos y proponer un método para la estimación de dichos desplazamientos. Se propone este método con el propósito de proporcionar a los ingenieros diseñadores, en la práctica profesional, una herramienta útil en la evaluación de estos efectos, permitiendo visualizar y revisar mejor el comportamiento de la estructura.

La mayoría de los diseñadores utilizan métodos aproximados de solución de los modelos matemáticos, que en algunos casos no calculan los desplazamientos y en otros casos sobreestiman las magnitudes de los desplazamientos inducidos por las cargas vivas, dejando en la mente de los diseñadores la idea errónea de que la estructura presentará deformaciones mayores que las reales y, en algunos casos, que éstas están cerca del límite máximo recomendado para los desplazamientos, cuando en realidad, las deflexiones estimadas por los métodos aproximados de solución están sobreestimadas. Esto último se demostrará en esta investigación.

Dentro del método a desarrollar, se propone una ecuación que permita determinar las deflexiones con una precisión de  $\pm 10\%$  de los valores esperados utilizando el MEF. Para ajustar dicha ecuación se elaboraron 12 análisis de estructuras, usando modelos tridimensionales de los puentes, con todos sus elementos, empleando el Método del Elemento Finito (MEF); lo anterior a través del programa SAP 2000 versión 14. Los modelos se hicieron variando los radios de curvatura y las longitudes de los claros de las vigas principales, para que sus resultados sean una buena aproximación de las deflexiones que presentarían las estructuras reales.

La razón de utilizar el MEF para ajustar la ecuación propuesta es que, de acuerdo con la American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO [1], y a la National Highway Institute [2] uno de los métodos aproximados más refinados de análisis para este tipo de estructuras es el Método del Elemento Finito (MEF).

Para la parte experimental se llevó a cabo una serie de pruebas de carga a escala natural en un puente de este tipo, construido en la Ciudad de Monterrey, Nuevo León, en el año 2006, el cual se instrumentó para obtener los desplazamientos y las deformaciones en las vigas principales del puente,



provocados por la carga viva actuante, los resultados de este ensaye se compararon con los resultados obtenidos utilizando la ecuación propuesta.

Adicionalmente se elaboró un análisis del puente en estudio, por el método aproximado del entramado plano, utilizando para su solución el programa STAAD Pro. Cuyo propósito fue comparar los resultados de las deflexiones calculadas usando herramientas de diseño que regularmente utilizan los diseñadores de este tipo de estructuras.

### **1.1 Antecedentes**

En la República Mexicana no hay estudios relativos al comportamiento bajo la acción de cargas de puentes curvos de acero y la normatividad para su análisis y diseño es muy escasa, ya que en las normas para el proyecto y diseño de puentes vigentes en México, establecidas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), aparecen muy pocas recomendaciones para su análisis y diseño. Actualmente la normativa empleada en México para los diseños de puentes curvos, son las indicadas en el Reglamento para Puentes de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 5ta Edición 2010 [1].

El estudio de este tipo de puentes comenzó hace poco más de 40 años, en los Estados Unidos, por lo que es relativamente reciente el estudio de este tipo de estructuras. Las investigaciones más recientes [2] han demostrado que su análisis debe ser diferente a los puentes rectos, por lo que en el reglamento AASHTO se han agregado especificaciones y recomendaciones para este tipo de puentes.

Aún y cuando se han realizado más investigaciones sobre este tema, a la fecha hay muchas interrogantes acerca del comportamiento de las deformaciones y

deflexiones debidas a la acción de las cargas vivas en los puentes curvos; de ahí la importancia de elaborar este trabajo para aportar conocimiento sobre el tema.

En las grandes ciudades es más frecuente el uso de puentes vehiculares curvos, debido a causas tales como: limitaciones de espacio, la convergencia de dos o más vialidades secundarias a una vialidad principal, así como las incorporaciones y desincorporaciones a los cuerpos principales. En los puentes vehiculares curvos es común el uso de acero estructural, debido a que las vigas se fabrican siguiendo la curva del camino, consiguiendo de esta forma una estructura estéticamente agradable y económica.

En general, los puentes curvos dentro de las zonas conurbadas de la República Mexicana tienen radios de curvatura que varían entre los 60 m y los 120 m. Son curvas muy cerradas debido a lo reducido de los espacios disponibles, que no permiten radios más amplios; en cambio, en vialidades fuera de estas zonas los radios varían de 180 m a 400 m, donde se procura tener radios grandes por la velocidad de proyecto y el tipo de carretera.

Si los radios son lo suficientemente grandes; esto es, radios mayores que el 0.06 de la longitud de las vigas, éstas caen en el caso que menciona el reglamento AASHTO [1], donde las vigas curvas pueden analizarse como vigas aisladas a flexión en su eje más el efecto de la curvatura utilizando un método aproximado como el V-Load [3].

El análisis de vigas curvas horizontales nació, de manera formal, con la publicación por Barré de Saint Venant en 1843: *“Mémoire sur le calcul de la résistance et de la flexion des pièces solides á simple ou á double courbure, en prenant simultanément en considérations les divers efforts auxquels elles peuvent être soumises dans tous les sens”*, en la Academia de Ciencias de Paris [4].

Sin embargo, hasta 1969 se formó el “*Consortium of University Research Teams (CURT)*” con el objetivo de elaborar los criterios y especificaciones para el diseño de puentes curvos horizontales de acero, a cargo de la “*Federal Highway Administration*”. Y fue hasta 1980 cuando aparece la primera guía para el Diseño de puentes curvos horizontales, editada por la *American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO* [5].

En 1988, en Japón [4], otro gran cuerpo de investigadores del tema de los puentes curvos de acero, y como producto de los resultados de las investigaciones elaboradas en el periodo de finales de los ‘70 a los primeros años de la década de los ‘80, publicaron el “*Hanshin Expressway Public Corporation’s Guidelines*” para el “Diseño de puentes de vigas curvas horizontalmente”, siendo este el otro gran aporte en el diseño de este tipo de puentes.

Posteriormente, hasta 1993 la AASHTO [4] editó nuevamente la “Guía y Especificaciones para Puentes Carreteros Curvos Horizontalmente”, pero básicamente es la misma que la de 1980, con pocas adiciones y modificaciones.

Fue a partir del 2008 que en los Estados Unidos de América se obligó a los diseñadores de puentes a utilizar el método del “*Load and Resistance Factor Design LRFD*”, por ser un método más racional y que da por resultados una construcción más económica. Por ser éste un método de diseño por cargas factorizadas se torna crítico conocer el comportamiento de la estructura bajo cargas en condiciones de servicio.

En México la normatividad para el análisis y diseño de los puentes vehiculares la dicta la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) y establece el uso del Método de Esfuerzos de Trabajo ASD y el Método de Factores de

Carga [6] que es el indicado como “*Load and Factor Design LDF del American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO*” [1].

## **1.2 Objetivos y metas**

Esta tesis tiene como objetivo el estudio del efecto de las cargas vivas en los desplazamientos en puentes curvos de acero, aportando conocimiento sobre las deformaciones y los desplazamientos que provocan las cargas vivas en este tipo de estructuras.

Actualmente el reglamento AASHTO indica que “*es opcional la revisión de las deflexiones debidas a cargas vivas en los puentes curvos*”, y en la normatividad mexicana, en este caso la norma N-PRY-CAR-6-01-007/04, la cual contiene los criterios generales para cuantificar los efectos de las cargas vivas en sistemas de piso de superestructuras de puentes, no se menciona requerimiento alguno de revisar los valores de las deflexiones en puentes rectos o curvos. Sin embargo, es sumamente importante revisar las deflexiones para verificar que estén abajo del límite recomendado para garantizar las condiciones de servicio de la estructura.

Por ello, uno de los objetivos de este trabajo es proponer un método para determinar los desplazamientos esperados debidos a la carga viva, para de esta forma estimar las deflexiones al utilizar los métodos aproximados y así comparar estos resultados con el límite recomendado de  $L/800$ .

La meta de esta tesis es clarificar el efecto que las cargas vivas provocan en un puente curvo, adicionalmente se compara el método propuesto para la estimación de los desplazamientos, con las mediciones de deflexión obtenidas con base en un ensaye a escala natural, con los resultados del modelo de



análisis empleando elementos finitos, y con las deflexiones obtenidas utilizando un método de análisis simplificado empleado regularmente por los diseñadores de este tipo de estructuras.

### **1.3 Hipótesis**

Este trabajo propone una ecuación para estimar de forma más precisa los desplazamientos inducidos por la carga viva en puentes curvos de acero, sin tener que utilizar MEF. Ya que la mayoría de los diseñadores de este tipo de estructuras utilizan métodos aproximados para la solución de los modelos matemáticos, esta ecuación será de gran utilidad, ya que los métodos aproximados sobreestiman o no calculan los desplazamientos debido a la carga viva.

Para comprobar la hipótesis se calcularán las deflexiones de varias estructuras variando sus radios y longitudes de claro. En los resultados obtenidos se correlacionarán las deflexiones calculadas usando un modelo de análisis tridimensional para cada tipo de puente, utilizando elementos finitos. Finalmente se compararán los resultados de la ecuación propuesta con los valores obtenidos en un ensaye de un puente de este tipo, a escala natural.

Actualmente el reglamento AASHTO permite que los puentes curvos que cubran una serie de requisitos y se analicen utilizando métodos aproximados. En este proyecto se demostrará que los desplazamientos debidos a cargas vivas usando los métodos aproximados están, en muchos de los casos, muy alejados de los que se obtendrían usando métodos basados en elementos finitos, por lo que se propone utilizar el procedimiento propuesto para de esta forma calcular deflexiones mas aproximadas a las obtenidas utilizando métodos más refinados de análisis, como el del elemento finito.

## **1.4 Organización de la tesis**

El método propuesto en este trabajo es el siguiente:

- a) Recopilación y revisión de la información bibliográfica disponible, acerca de los métodos de análisis de puentes curvos.
- b) Procedimiento propuesto para la estimación de los desplazamientos.
- c) Desarrollo del modelo de análisis utilizando elementos finitos, que se utiliza para calibrar el procedimiento propuesto para el cálculo de los desplazamientos.
- d) Análisis de la estructura utilizando el método aproximado del entramado plano, utilizando un programa computacional.
- e) Aplicación a un caso de estudio.
- f) Pruebas experimentales de un puente curvo a escala natural.
- g) Comparación de los resultados obtenidos.
- h) Conclusiones y recomendaciones.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA DISPONIBLE**

#### **2.1 Definición y diferencias entre los puentes rectos y los curvos.**

La definición de un puente de vigas curvas, de acuerdo con la “*American Association of Highway and Transportation Officials, AASHTO*”, versión “*Load and Resistance Factors Design*”, LRFD, es un puente formado por vigas principales del tipo IPR, cajas cerradas o tubulares y que tienen la particularidad de que son curvos en el plano horizontal. Estos pueden estar formados de curvas simples de radio constante, o tener diversos radios, cambios en su curvatura y transiciones, con radios variando linealmente en la longitud de las vigas, en todos estos casos; generalmente, la losa de tráfico es solamente curva en planta y de un espesor constante.

Un puente de vigas rectas, es aquel donde las vigas son paralelas y tangentes al eje del camino, la losa de tráfico es de espesor constante y tangente al camino.

Los puentes de vigas rectas, por lo general son estables por sí mismos durante la construcción, no así los de vigas curvas, donde las vigas no son estables por sí mismas, pues dependen y necesitan sujetarse entre sí durante la construcción, utilizando para ello los diafragmas. Ya en funcionamiento, los puentes de vigas rectas pueden trabajar sin los diafragmas; en cambio, los de vigas curvas requieren de los diafragmas para su estabilidad y equilibrio, trabajando más como un conjunto de vigas.

En los puentes de vigas rectas las acciones principales a considerar en el diseño de las vigas son:

- El momento flexionante y la fuerza cortante en el eje longitudinal de la viga
- La distribución de la carga viva en las vigas se hace de acuerdo con la tabla 4.6.2.2.2b-1 del AASHTO [1] donde se toman en cuenta factores tales como: la separación entre las vigas, la rigidez longitudinal de la viga, la longitud del claro y el espesor de la losa de concreto, así como si el puente es de una línea de diseño (carril de circulación) o de dos o más líneas de diseño (carriles de circulación).
- Por consiguiente, las acciones en el eje transversal de la viga se consideran relativamente pequeñas y son ignoradas en el diseño.

En cambio, en los puentes de vigas curvas adicionalmente al momento flexionante y fuerza cortante en el eje longitudinal de la viga, se deben de considerar factores tales como:

- Los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes en el eje menor de las vigas.
- La torsión en las vigas, que tenderá a ser no uniforme a lo largo del eje de la viga.

- Los cortantes que tenderán a deformar los patínes de las vigas.

Como puede apreciarse, debido a lo arriba expuesto, las deflexiones debidas a las cargas muertas y a las cargas vivas en puentes de vigas rectas son relativamente fáciles de estimar, no así en los puentes de vigas curvas, donde las acciones en los otros ejes influyen en el valor de la deflexión en el eje longitudinal, tanto para las cargas uniformemente distribuidas, como para las cargas muertas igual que para las cargas concentradas móviles. En este caso, las cargas vivas y su distribución en el puente.

## **2.2 Revisión de la bibliografía existente acerca de los métodos de análisis de puentes curvos**

### **2.2.1 Solución exacta para vigas rectas y curvas a flexión**

Sólo algunos casos de vigas de sección transversal simple, sujetas a flexión, tienen una solución exacta de su modelo matemático, ya que estos problemas requieren solucionar una serie de ecuaciones diferenciales considerando las condiciones de frontera de las vigas estudiadas. Así, solo los casos donde se tienen condiciones de frontera simples, tienen solución exacta, v. gr. Las vigas con secciones transversales rectangulares se pueden resolver de manera exacta [22]. Timoshenko [22] presenta las ecuaciones para determinar los esfuerzos en los ejes principales, así como los esfuerzos cortantes y los desplazamientos en los dos ejes principales del elemento.

Las vigas utilizadas en este estudio tienen una sección transversal del tipo viga I, condición que no permite obtener una solución exacta para el cálculo de los

esfuerzos en los ejes principales, los esfuerzos cortantes y los desplazamientos en los dos ejes principales del elemento. Así para obtener una solución con precisión satisfactoria se deben utilizar otros métodos [22], tales como:

- El método de la burbuja de jabón o también llamada analogía de la membrana (soap-film method)
- Método de las diferencias finitas de las ecuaciones de elasticidad; de este método se deriva la mayoría de los procedimientos que tratan de obtener una solución aproximada del modelo matemático de este tipo de estructuras.

### **2.2.2 Métodos de análisis de puentes curvos**

Para el análisis de un puente curvo de acero pueden utilizarse varios tipos de modelación [2] [3] y [4], ya sea en 1D, 2D o 3D, de esta manera los modelos de este tipo de estructuras pueden ser desde muy simples, hasta requerir un muy refinado método para su solución. Las condiciones geométricas del puente, tales como: el radio de curvatura, el número de vigas y su separación, el espesor de la losa de tráfico, y las propiedades geométricas de las secciones transversales de las vigas y la losa, son las que determinan qué tan simple o refinado debe ser el análisis de la estructura para que los resultados del análisis sean adecuados.

Los métodos más utilizados para el análisis de un puente curvo de acero se pueden clasificar en dos grandes grupos:

**A) Análisis aproximados.**

**B) Análisis más refinados.**



### 2.2.2.1 Métodos de análisis aproximados

Estos métodos requieren un modelo de análisis muy sencillo y pueden hacerse de forma manual, sin el uso de computadora, y son aceptados por el reglamento AASHTO [1].

Los métodos de análisis aproximados más comúnmente usados para el análisis de vigas curvas de puentes de acero son:

1. **Análisis utilizando factores de distribución de las cargas:** Es un método empírico aplicable a puentes, artículo 4.6.2.2. [1], donde se asume que no hay distribución longitudinal de las cargas de las llantas de los vehículos que transiten, solo hay un factor de distribución lateral que se determina mediante fórmulas aproximadas. Las vigas se analizan individualmente, no se considera al puente como un sistema estructural formado por la totalidad de las vigas.
2. **Método del entramado plano** [2]: Es un método en el que la estructura se modela como un ensamblaje de vigas en un plano, con una traslación y dos rotaciones, de tal manera que se tienen 3 grados de libertad. Este método no toma en cuenta alabeos ni torsiones. Este método fue primeramente introducido por Lavelle and Boicke en 1965 y desarrollado posteriormente por Lavelle en 1971 y por Lavelle y Laska en 1975.
3. **Método del marco espacial** [2]: Es un método de análisis para elementos curvos de sección transversal abierta (como la viga tipo IPR) o de sección transversal cerrada (de cajón o tubular), fue introducido por Brennan y Mandel en 1973. Los miembros curvos son idealizados como miembros rectos en tres dimensiones, mientras que los diafragmas y los

arriostramientos laterales se consideran como miembros tipo armadura (articulados en ambos extremos) que sólo pueden tomar cargas axiales. Los efectos de alabeos y torsiones no son considerados en este tipo de análisis.

4. **Método del V-LOAD** [3]: Este método fue propuesto inicialmente por la Asociación de Acero Estructural de los Estados Unidos en 1963, por los autores Richardson, Gordon y Asociados. Posteriormente, en 1965 en el Manual de Diseño de estructuras de Puentes editado por la misma Asociación se presentó nuevamente el método pero modificado grandemente para hacerlo más amigable y fácil de aplicar en sistemas de vigas de puentes.

En este método se asume que la carga interna producida por la torsión en el puente, producto solamente de la curvatura del mismo, es resistida por un juego de cargas equivalentes de cortante entre las trabes adyacentes (efecto secundario). En este método se considera a las vigas curvas como si fueran rectas, equivalentes con longitud del claro igual a su longitud de arco. Las acciones finales de cortante y momento flexionante en las vigas curvas es el producido por los efectos producidos por los cortantes (efecto secundario) más las producidas en las vigas analizándolas como rectas.

5. **Método de carga  $M / R$**  [17]: El método de la carga  $M / R$  es un método para el análisis de vigas curvas de sección transversal de tipo cajón o tubular. Es un método muy similar al método del V LOAD, que está basado en los principios de la Estática y puede utilizarse para estimar la carga torsional y las deformaciones torsionales asociadas con esa carga en vigas de sección transversal de tipo cajón o tubular.

#### 2.2.2.2 Métodos de análisis más refinados

Estos métodos requieren la elaboración de uno o más modelos de análisis más complejos y/o elaborados, y requieren análisis numéricos resueltos por computadora (pueden resolverse usando hojas de cálculo o programas computacionales elaborados para ese fin).

Los métodos de análisis más refinados [17] que son más comúnmente usados para el análisis de vigas curvas de puentes de acero son:

1. **Métodos basados en elementos finitos** [17]. El concepto básico de este tipo de análisis es dividir cada uno de los elementos estructurales del puente en una serie de elementos finitos pequeños, donde cada uno de estos elementos tiene sus nudos conectados, de tal forma que el comportamiento de cada elemento y de la estructura completa se asume que es función del equilibrio de los nudos.

Estos métodos basados en elementos finitos son de los más precisos y de uso muy general, ya que no tienen limitaciones de geometrías, cargas, condiciones de frontera, análisis estáticos o dinámicos, así como la aplicabilidad a vigas del tipo IPR o secciones de cajón y/o tubulares. Los métodos más comúnmente usados en este tipo de análisis de puentes incluyen: métodos de análisis de entramados en 2D, métodos de análisis para placas y vigas excéntricas, método generalizado de análisis de entramados y métodos de análisis en 3D, usando elementos finitos.

- a) **Método de análisis de entramados en 2D** [17]. Este método también es conocido como “Entramado Plano” o “Método de Análisis del Entramado”. En este método la estructura se divide en elementos pequeños de un entramado plano con tres grados de libertad en cada nudo (desplazamiento vertical y ángulos de rotación en el eje longitudinal y en el transversal). La relación de aspecto de los

elementos, el espaciamiento entre nudos y otros parámetros del modelaje son establecidos en el Artículo 4.6.3.3.1 y en los Comentarios C4.6.3.3.1 del *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* [1].

- b) **Métodos de análisis de placas y vigas excéntricas** [17]. Es una variante del método de análisis del entramado en 2D. La losa es modelada utilizando elementos placa o cascarón, mientras que las vigas y marcos transversales se modelan empleando elementos de viga, desplazándolos fuera del elemento placa para representar los desplazamientos del eje neutro de las vigas o marcos transversales del eje neutro de la losa. Estas recomendaciones aparecen discutidas en el Artículo C46.3.3.1 del *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* [1], la longitud del desplazamiento es típicamente igual a la distancia entre los centroides de las secciones de viga con la losa. Este método es un poco más refinado que el análisis del entramado en 2D.
- c) **Método generalizado de análisis de entramados** [17]. Este método es una modificación del método de análisis de entramados en 2D, donde se le agregarán más grados de libertad. Algunas mejoras típicas de este método incluyen el modelado de los marcos transversales o diafragmas, con la consideración de agregar las deformaciones por cortante a las deformaciones por flexión, modelando la rigidez al alabeo de secciones tipo IPR, modelando los apoyos, el arsisotramiento lateral, los marcos transversales o diafragmas con su elevación física dentro de la estructura o combinaciones de los mismos.
- d) **Métodos de análisis de elementos finitos en 3D** [17]. La categoría de métodos de análisis de elementos finitos en 3D se entiende que abarca cualquier método de análisis o diseño que incluye un modelo de análisis estructural computarizado completamente en 3D, incluyendo en el

modelo: patínes de vigas usando elementos viga o elementos sólidos del tipo placa/cascarón, modelando las almas de las vigas usando elementos sólidos del tipo placa/cascarón, modelando la losa usando elementos sólidos tipo placa/cascarón, y modelando los marcos transversales o diafragmas usando elementos viga, armadura o sólidos de tipo placa/cascarón, modelando los apoyos de las vigas. Este método se considera el “más preciso” método de análisis disponible para el análisis o diseño de puentes con curvaturas severas o esviados.

2. **Método de la franja finita** [4]. Este es un método numérico donde el puente curvo se divide en franjas en la dirección circunferencial y con soportes en la dirección radial, propuesto por Meyer y Scordelis en 1971. El análisis incluye flexión y acciones de membrana, también alabeo y efectos de distorsión. Este método es más simplificado que los métodos de elementos finitos, debido a su menor número de incógnitas o grados de libertad. El método utiliza en el análisis series armónicas / Fourier en la dirección circunferencial y análisis de elemento finito en la otra dirección.
3. **Método de diferencias finitas** [4]. En este método, propuesto por Heins y Looney en 1967, un entramado es sobrepuesto en la estructura y las ecuaciones diferenciales que gobiernan son remplazadas por ecuaciones diferenciales que se resuelven en cada cruce del entramado de forma algebraica. El método considera la interacción de todas las vigas y la losa del tablero analizado.
4. **Solución de la ecuación diferencial que gobierna el sistema** [4]. En este método se obtiene una solución analítica de la ecuación diferencial que gobierna el sistema. Esta técnica de análisis fue desarrollada por Spates y Heins en 1968 y revisada por ellos mismos en 1970; pero dicha solución es generalmente una serie convergente cerrada del tipo Serie de Fourier.

5. **Método de deflexión–pendiente** [4]. Es un método aproximado; porque en el método la ecuación diferencial parcial se establece en términos de las ecuaciones de Deflexión-Pendiente, y la solución se asume que será una Serie de Fourier. El análisis incluye los efectos de curvatura, la torsión no uniforme y los diafragmas. Las ecuaciones necesarias para analizar un tablero curvo de losa con vigas usando la técnica de Deflexión–Pendiente fue presentada por Heins en 1967.

En 1970 Bell y Heins y, posteriormente, en 1972 Heins y Bell [4] desarrollaron y programaron el método de análisis de un sistema de piso, incluyendo las vigas de un puente curvo utilizando Deflexión–Pendiente y series de Fourier. El método considera la interacción de placas ortotrópicas con vigas curvas elásticas. El efecto de alabeo y torsión pura, flexión y radios de curvatura fueron tomados en cuenta en el análisis.

En 1974, Douglas y Gambrell [4] desarrollaron un método para predecir esfuerzos y deflexiones de puentes carreteros, con vigas curvas horizontalmente, que arroja resultados muy cercanos a los observados en pruebas de este tipo de estructuras. Este método incorpora ecuaciones de equilibrio y compatibilidad, condiciones de frontera, ecuaciones de deflexión –pendiente y condiciones de restricciones de los soportes interiores para generar la solución de los momentos internos, torques, fuerzas cortantes, deflexiones y rotaciones.



## **CAPÍTULO 3**

### **MÉTODO PROPUESTO PARA ESTIMAR LOS DESPLAZAMIENTOS EN PUENTES CURVOS DE ACERO**

La aportación de esta tesis es presentar una fórmula para el cálculo de los desplazamientos en vigas curvas de puentes de acero, considerando las cargas vivas.

Debido a que los puentes son estructuras tridimensionales, las deformaciones y deflexiones que se presentan son difíciles de estimar, ya que involucran elementos de distintos materiales, concreto, acero de refuerzo, y acero estructural. Así mismo, los elementos estructurales que forman el puente presentarán diferentes comportamientos al estar bajo las cargas; como por ejemplo, la losa de tráfico que es continua sobre las vigas principales, las cuales están simplemente apoyadas en este caso; los diafragmas, que en este caso trabajan como armaduras, y así los distintos elementos que forman la estructura; finalmente, al estar bajo la carga viva trabajarán en conjunto como un todo.

Debido a lo anterior, es necesario establecer una serie de hipótesis básicas para determinar un procedimiento relativamente sencillo al estimar las deflexiones en las vigas principales del puente curvo de acero. **El procedimiento propuesto parte de las especificaciones estándar AASHTO LRFD de [1].**

### **3.1 Hipótesis y requisitos considerados en el procedimiento para estimar los desplazamientos**

**En este procedimiento se consideran las siguientes hipótesis:**

- Comportamiento elástico, concreto no agrietado para comportamiento y análisis estructural, de acuerdo con King, et al. 1975, Yen, et al. 1995, [1].
- Teoría de deformaciones pequeñas.
- Relación de aspecto en planta, ancho a longitud efectiva, mayor que 2.5.
- Satisfacer los requisitos de equilibrio y compatibilidad de deformaciones, artículo 4.4. de [1].

**Para aplicar este procedimiento, el puente debe de cumplir con los requisitos del artículo 4.6.2.2.1. de AASHTO [1], que consisten básicamente en:**

- El puente tiene 4 ó más vigas. Todas las vigas tienen la misma sección transversal constante y son simétricas en ambos ejes.
- Los voladizos del puente no exceden de 910 mm.
- Todas las vigas del puente son concéntricas, están espaciadas a una separación constante y sus apoyos no están esviados más de 10 grados de las líneas de centro de las vigas.
- La losa de tráfico es de concreto reforzado y de espesor constante.

- Los diafragmas deben abarcar el 75 % de la altura de las vigas, deben estar formados por diagonales y cuerdas superior e inferior, y debe cumplir el espaciamiento especificado en el artículo 6.7.4.2. [1].

Mención aparte, es como se considera la rigidez de las vigas principales del puente, para lo cual se utiliza la recomendación de [1], que a continuación se detalla.

### 3.2 Rigidez longitudinal de la viga

Las deflexiones dependen grandemente de los valores de inercia y rigidez a flexión que se utilizarán para su estimación, y como se mencionó anteriormente, la estructura que estará sujeta a las acciones de las cargas vivas trabajará como un todo, por lo que es muy importante utilizar un valor de inercia y rigidez que represente el comportamiento del puente en su conjunto.

En las especificaciones para puentes del AASHTO versión LRFD, 2ª edición 1998, que se basaron en las investigaciones de T Zokaie, et al [24], se propuso el empleo de una **Rigidez longitudinal de la viga  $K_g$** , aplicable a vigas interiores para puentes simplemente apoyados, para la determinación del factor de distribución de carga viva en las vigas principales.

El valor de la Rigidez longitudinal  **$K_g$**  tal como está propuesto en las especificaciones AASHTO, trata de considerar el aporte de la losa de concreto en la rigidez de la viga de acero, su empleo es para considerar el trabajo en conjunto de todo el puente, al estar sujeto a las cargas vivas.

Por eso en este procedimiento para estimar las deflexiones en la viga debidas a las cargas vivas se consideró más adecuado el empleo de  **$K_g$** , ya que se

utiliza actualmente en las especificaciones AASHTO vigentes para el cálculo del factor de distribución de carga viva en las vigas interiores.

### **3.3 Ecuación propuesta para el cálculo de las deflexiones por carga viva en vigas de puentes curvos de acero**

Se propone una ecuación para la estimación de la deflexión al centro del claro para una viga de un puente curvo de acero, basándose en la ecuación de la deflexión al centro del claro de una viga simplemente apoyada, con carga concentrada al centro, afectándola por un factor que relacione el claro de la viga con el radio de curvatura.

Partiendo de lo anterior, se propone la siguiente ecuación (ec 3-1) para estimar la deflexión al centro del claro que presentan las vigas de sección I, de acero, de un puente curvo:

$$\Delta = \frac{P L_{sc}^4}{\alpha E_s K_g R} \quad \text{Ec 3-1}$$

Donde:

**P** La Carga concentrada, medida en Kg, que corresponde a la carga total del vehículo de diseño, para las carreteras del tipo ET, A y B, de acuerdo con la clasificación de la SCT, o aplicable a las vialidades principales en las ciudades. Se utilizará la carga total del modelo IMT 66.5, que tiene un peso total de 66,500 Kg, o el modelo IMT 20.5 que equivale a un peso total de 20,500 Kg.

**L<sub>sc</sub>** La Longitud total de la viga, medida en centímetros, y corresponde a la longitud entre los apoyos, considerada en la dirección de su eje longitudinal sobre la curva.

- R** Radio del eje de la viga, medida en centímetros.
- Es** Módulo de elasticidad del acero estructural. En este caso tiene un valor de 2,100,000 Kg/cm<sup>2</sup>.
- K<sub>g</sub>** Parámetro de rigidez longitudinal, en cm<sup>4</sup>, establecido en los artículos 4.6.2.1. y 4.3 y 4.6.2. de [1].

$$K_g = n [ I + A e_g^2 ] \quad \text{Ec 3-2}$$

Donde:

$$n = \frac{Eb}{Ed}$$

$Eb$  = Módulo de elasticidad del material usado en la viga, en este caso del acero estructural  $E_s$

$Ed$  = Módulo de elasticidad del material usado en la losa, en este caso del concreto reforzado

$$Ed = 15,100 * \sqrt{F'c}$$

$A$  = Área de la viga en cm<sup>2</sup>, no se considera una sección compuesta.

$I$  = Inercia de la viga de acero típica en cm<sup>4</sup>

$e_g$  = Distancia entre los centros de gravedad de la viga y de la losa.

El coeficiente  $\alpha$  es igual a:

$$\alpha = 1.5 - 4 \times 10^{-5} R + 4 \times 10^{-6} Lsc \quad \text{Ec 3-3}$$

El resultado de esta ecuación 3-1, es el valor de la deflexión al centro del claro, medida en centímetros, debida solamente a la carga viva para la viga exterior del puente en consideración.

## **CAPÍTULO 4**

### **SIMULACIÓN NUMÉRICA**

#### **4.1 Método de solución utilizado en la simulación**

Para la realización de la simulación se utilizó el Método del Elemento Finito (MEF) recomendado por el reglamento AASHTO [1] y varios autores en sus investigaciones, entre ellos el Dr. Daniel G. Linzell et al. [19] 2000, B. A. McElwin et al. [13] 2000, E. D. Sotelino et al. [23] 2004, A. E. Barrett et al. [7] 2009, J. R. Morril et al. [27] 2016. El MEF se aplicó realizando una modelación geométrica tridimensional del caso de estudio.



## **4.2 Análisis de la estructura utilizando elementos finitos, programa SAP 2000 v 14**

Para el desarrollo del análisis de la estructura con elementos finitos, se utilizó el programa SAP 2000 versión 14, que es un programa que considera las siguientes hipótesis:

1. El comportamiento del material será dentro del intervalo elástico – lineal: en cuanto a su módulo de Young, relación de Poisson, densidad del material, coeficiente de expansión térmica y módulo de cortante.
2. El material es isotrópico, homogéneo y elástico.
3. Teoría de deflexiones pequeñas; las deflexiones de la estructura son pequeñas y no provocan que el punto de aplicación de la carga se desplace significativamente al deflectarse.

Como se mencionó en la introducción, se elaboraron 12 modelos de puentes, variando el radio y la longitud sobre la curva, que servirán como base para afinar la ecuación propuesta para la estimación de la deflexión. Se analizan 4 radios distintos: 125, 150, 175 y 200 m, y para cada uno de dichos radios se analizaron 3 longitudes distintas: 20, 25 y 30 m.

La sección transversal típica para las estructuras será la utilizada en el puente que se seleccionó para la investigación experimental, que consta de 5 vigas principales espaciadas @ 160 cm centro a centro, con voladizos de 75 cm, dando un ancho total de 790 cm, con 2 carriles de circulación y parapetos en cada extremo.

Los elementos estructurales del puente típico son: 5 vigas principales tipo IPR, los diafragmas de APS, los conectores de corte CPS y la losa de tráfico de concreto reforzado, de acuerdo con sus medidas. Los elementos de acero estructural son de calidad A-36 con  $F_y = 2,530 \text{ Kg/cm}^2$ , y la losa es de concreto

con  $F'_c = 300 \text{ Kg/cm}^2$  y acero de refuerzo  $F_y = 4,200 \text{ Kg/cm}^2$ . Un aspecto del modelo geométrico se presenta en la figura 4.2.1

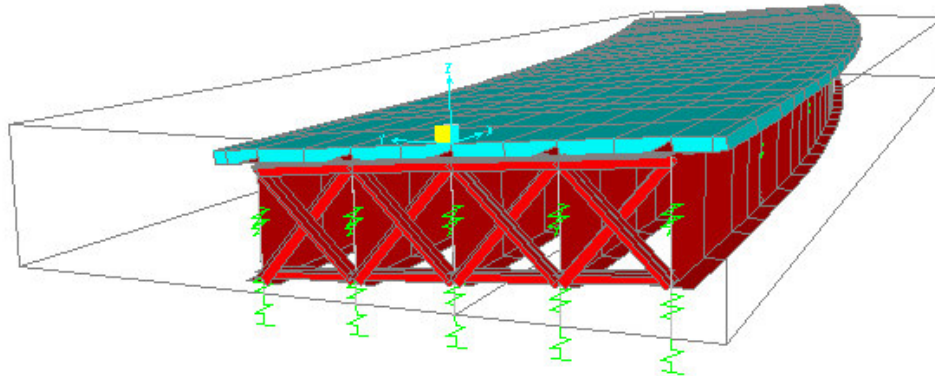


Figura 4.2.1 Modelo tridimensional de análisis.

Las hipótesis básicas del modelo de análisis son:

Para el modelo en 3D de elementos finitos, se utilizaron los siguientes tipos de elementos finitos: elementos de tipo “Viga” en: conectores de corte y diafragmas; y elementos de tipo “Shell” en las vigas de acero; usando elemento tipo “Solido” en losa de concreto, todos estos tal como los recomienda el Instituto Nacional de Carreteras [2].

En la figura 4.2.2 se aprecia el modelo de análisis con la indicación del ancho donde se moverá la carga viva, a 60 cm del borde del parapeto, siguiendo la recomendación del artículo 3.6.1.3.1 del reglamento AASHTO [1].

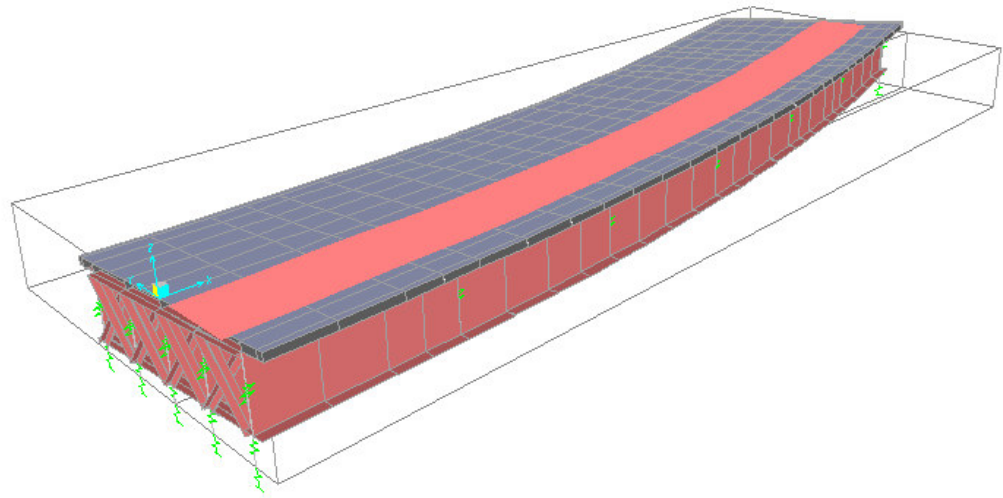


Figura 4.2.2 Modelo de análisis con trayectoria del vehículo.

En los modelos de análisis se utilizó el tren de carga IMT 66.5, establecido en las Normas SCT [28]. En la figura 4.2.3 aparecen los datos del tren de carga utilizado.

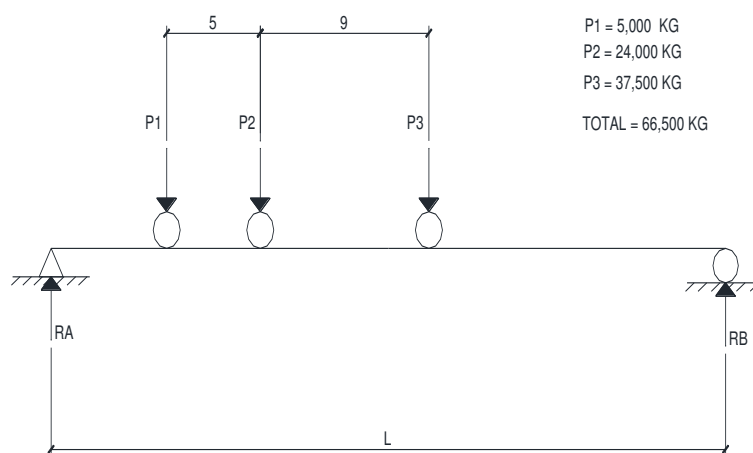


Figura 4.2.3 Tren de carga IMT 66.5 usado en los análisis.

La línea de influencia del modelo de análisis aparece en la figura 4.2.4

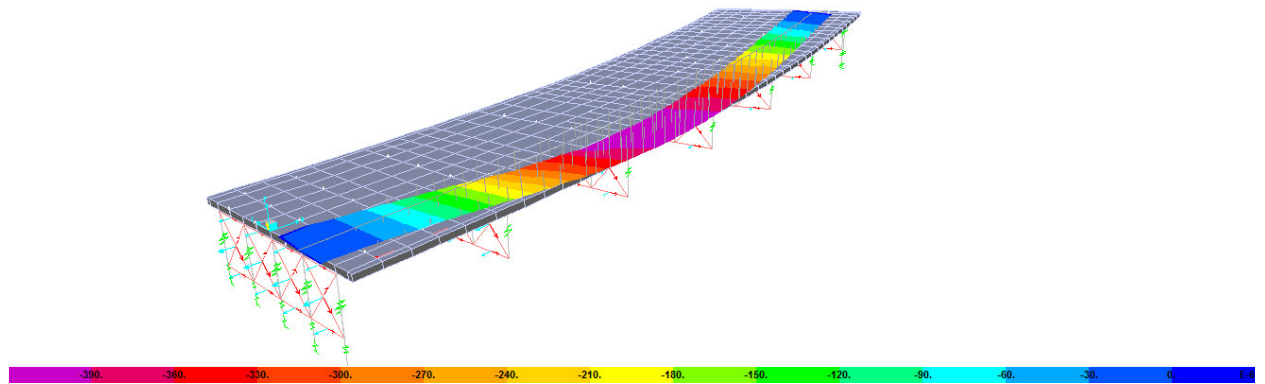


Figura 4.2.4 Línea de influencia del modelo de análisis.

El resumen de los resultados de los análisis de los doce modelos aparecen en la Tabla 4.3.1. En la figura 4.2.5 se muestra la deformada típica de los puentes bajo la carga viva del tren de carga IMT 66.5.

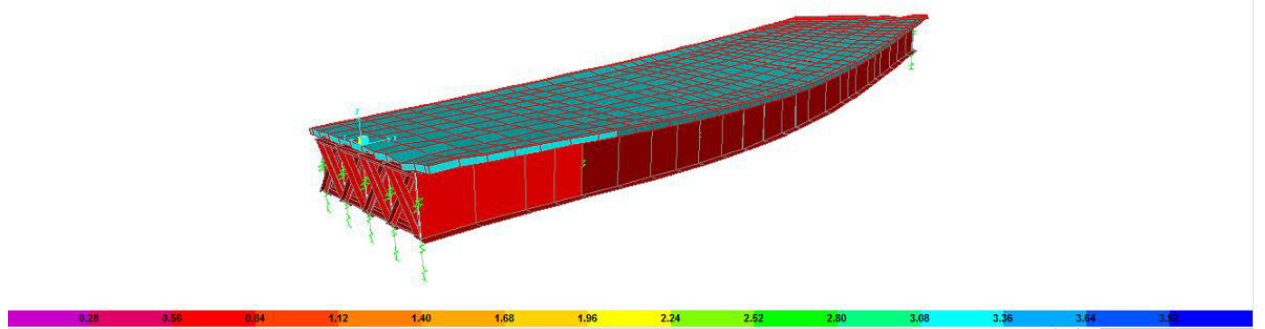


Figura 4.2.5 Puente deformado por la acción del tren de carga.

### 4.3 Resumen de los resultados de la simulación numérica de los doce modelos de puentes

En la tabla 4.3.1 aparecen los resultados de las deflexiones máximas para los doce modelos de puentes analizados, y que se utilizaron para evaluar el coeficiente  $\alpha$  en la ecuación 3-1 propuesta.

Tabla 4.3.1 Deflexiones máximas en los doce modelos de puentes analizados usando SAP 2000

Estructura	Deflexión (cm)
Puente con Radio = 125 m y Lsc = 20 m	0.51
Puente con Radio = 125 m y Lsc = 25 m	1.15
Puente con Radio = 125 m y Lsc = 30 m	2.18
Puente con Radio = 150 m y Lsc = 20 m	0.49
Puente con Radio = 150 m y Lsc = 25 m	1.11
Puente con Radio = 150 m y Lsc = 30 m	2.10
Puente con Radio = 175 m y Lsc = 20 m	0.48
Puente con Radio = 175 m y Lsc = 25 m	1.06
Puente con Radio = 175 m y Lsc = 30 m	2.00
Puente con Radio = 200 m y Lsc = 20 m	0.47
Puente con Radio = 200 m y Lsc = 25 m	1.04
Puente con Radio = 200 m y Lsc = 30 m	1.94

## **CAPÍTULO 5**

### **DESCRIPCION DEL CASO DE ESTUDIO Y APLICACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO**

#### **5.1 Desarrollo de los trabajos**

Para demostrar la aplicación del procedimiento propuesto para el cálculo de las deflexiones verticales debidas a cargas vivas se utilizó como caso de estudio una estructura de ese tipo construida recientemente en la ciudad de Monterrey y que actualmente está en uso.

El proceso para demostrar la aplicabilidad del procedimiento propuesto para la estructura en estudio será de la siguiente forma:

- a) **Utilización del procedimiento propuesto.** Se calculó la deflexión debido a carga viva para la viga del puente.
- b) **Simulación numérica.** Se elaboraron dos modelos para la investigación analítica:
  - b.1 Modelo de análisis utilizando elementos finitos de la estructura utilizada en el ensaye. Con este modelo se analizó la estructura usando la carga viva aplicada en el ensaye a escala natural. Se obtuvieron las deflexiones verticales de las vigas, para compararlas con las obtenidas por la ecuación propuesta.
  - b.2 Método aproximado de análisis de un entramado plano. Se hizo el análisis del puente utilizando uno de los métodos aproximados arriba indicados, el cual se resolvió utilizando un programa de análisis regularmente utilizado por los diseñadores. Se obtuvieron las deflexiones verticales debidas a la carga viva y se compararon con los resultados obtenidos utilizando la ecuación propuesta y con el modelo de análisis usando elementos finitos.
- c) **Simulación experimental.** Se hizo un ensaye a escala natural, donde se midieron las deflexiones debidas a la carga viva, las cuales se comparan con la deflexión obtenida por la ecuación propuesta y con los valores obtenidos en la investigación analítica.



## 5.2 Caso en estudio

El puente en estudio es un puente curvo de acero que forma parte del Complejo Vial Fundidora–Canal Santa Lucía, en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, y fue construido en 2006. El puente en cuestión se utiliza para la vuelta izquierda del tráfico proveniente de la Calle Aramberri, para tomar la Av. Fundidora, que se encuentra a un costado del Parque Fundidora. El puente es un paso superior formado por 5 claros y sus rampas de entrada y de salida. La pendiente longitudinal del puente es del 7 %. Figura 5.2.1.



Figura 5.2.1 Vista general del puente en estudio.

El puente tiene un ancho total de 7.90 m y descontando los parapetos, quedan 7.00 m para la circulación de vehículos. El puente cuenta con 2 carriles de circulación y la superestructura del puente está formada por 5 vigas de acero tipo IPR, espaciadas @ 1.60 m de centro a centro. Todas las vigas son paralelas y tienen distintos radios. Sobre las vigas se tiene como losa de tráfico

una losa de concreto reforzado de 0.20 m de espesor colada en el sitio. Ver figura 5.2.2.



Figura 5.2.2 Vista superior del puente en estudio.

Las vigas principales son del tipo IPR, con longitudes de claro de 29.11 m a 29.89 m y radios de 180.30 m a 186.70 m. Las vigas son de sección transversal constante, excepto al llegar al apoyo, donde se les hace un recorte para llegar al apoyo de neopreno. En la sección constante tienen las siguientes medidas:  $d = 1800$  mm,  $b_f = 600$  mm,  $t_w = 19$  mm,  $t_f = 38.1$  mm con un peso nominal de 616 Kg/ml ver figura 4.2.3. Los conectores de corte son del tipo CPS de 4" de peralte, de 0.25 m de longitud espaciados @ 0.30 m, con un peso nominal de 8 Kg/ml.



Figura 5.2.3 Viga típica del puente en estudio.

Los diafragmas son metálicos, utilizando 2 ángulos de 6" de peralte con 3/8" de espesor, con un peso nominal de 22.17 Kg/ml por pieza, como cuerda inferior y usando un APS con las mismas características, como diagonales en forma de cruz, ver figura 5.2.4.



Figura 5.2.4 Vigas principales y diafragmas del puente en estudio.

Todos los elementos de acero estructural son de calidad A-36 con  $F_y = 2,530 \text{ Kg/cm}^2$ , y la losa es de concreto con  $F'_c = 300 \text{ Kg/cm}^2$  y el acero de refuerzo empleado como refuerzo en la losa tiene un  $F_y = 4,200 \text{ Kg/cm}^2$  y cumple la norma ASTM 615. Todas las vigas se fabricaron en un taller, incluyendo sus conectores de corte. En el campo después del montaje de las vigas en el puente, se colocaron los diafragmas.

El puente ha estado en funcionamiento desde 2007 y a la fecha no ha presentado deformaciones y/o deflexiones que se aprecien. No hay registros de problemas estructurales y de acuerdo con las autoridades, se le ha dado el mantenimiento adecuado.

El claro utilizado en el estudio es el comprendido entre los ejes 4 y 5, con una distancia entre ejes de 31.00 m. La viga exterior del lado externo de la curva fue la empleada en el estudio, por ser la que tiene la mayor longitud.

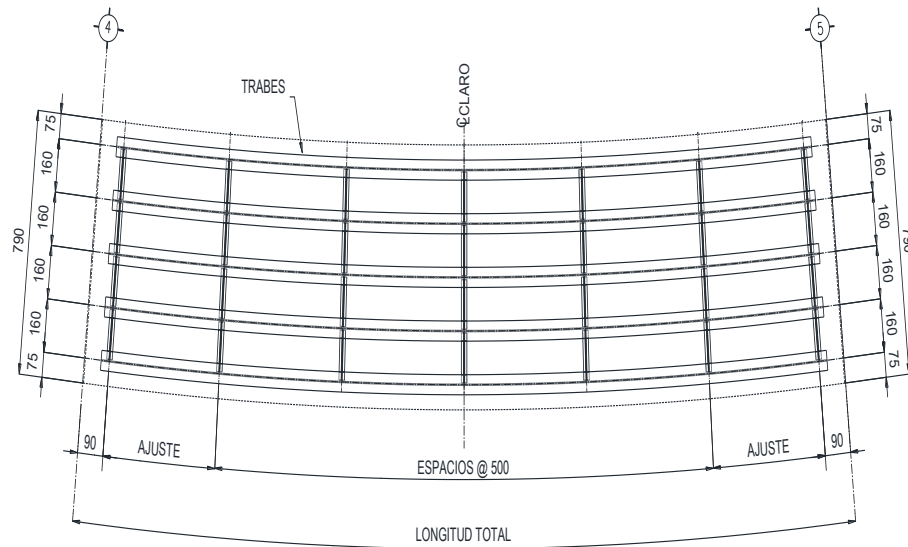


Figura 5.2.5 Planta del claro del puente en estudio.

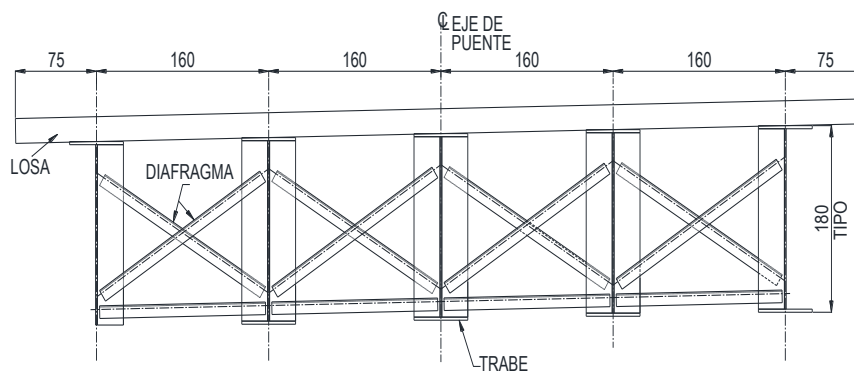


Figura 5.2.6 Sección transversal del puente en estudio.

### 5.3 Aplicación de la ecuación propuesta al caso en estudio

Revisión de los requisitos para la aplicación de la ecuación propuesta:

- El puente tiene 4 ó más vigas; todas las vigas tienen la misma sección transversal constante y son simétricas en ambos ejes. Sí cumple, en este caso se tienen 5 vigas en este puente en estudio.
- Los voladizos del puente no exceden los 910 mm, Sí cumple. Se tienen voladizos de 750 mm del centro de la viga al paño exterior de la losa de tráfico.
- Todas las vigas del puente son concéntricas, están espaciadas a una separación constante y sus apoyos no están esviados más de 10 grados de las líneas de centro de las vigas. Sí cumple.
- La losa de tráfico es de concreto reforzado y de espesor constante. Sí cumple, pues es de 20 cm de espesor constante.
- Los diafragmas deben abarcar el 75 % de la altura de las vigas, deben estar formados por diagonales y cuerdas superior e inferior. Sí cumple, pues abarca el 85 %.

Adicionalmente, se debe cumplir con el espaciamiento especificado para los diafragmas intermedios, de acuerdo al artículo 6.7.4.2. de la referencia [1], donde se indica lo siguiente:

$$L_b \leq L_r \leq R/10$$

ecuación 6.7.4.2-1 de [1]

En los comentarios de ese mismo artículo se señala que se puede utilizar la siguiente ecuación para determinar los valores de  $L_b$  usando la ecuación C6.7.4.2-1 de la referencia [1]

$$L_b = \sqrt{\frac{5}{3} * r_{\sigma} * R * b f}$$

Con el límite de que  $L_b \leq R/10$

En los comentarios se menciona que se puede utilizar el valor máximo de  $r_{\sigma} = 0.30$ , como relación de los esfuerzos de flexión. Estas ecuaciones se desarrollaron del concepto del Método **V load** [3](Richardson, et al. 1976) y han mostrado un buen nivel de correlación con los resultados de análisis en tres dimensiones, utilizando elementos finitos, si se utilizan espaciamientos relativamente uniformes de los diafragmas o marcos con cruces utilizados como diafragmas, Davidson J. S. et al. 1996 [15].

$$L_b = \sqrt{\frac{5}{3} * 0.3 * 186700 * 600}$$

$$L_b = 7,484 \text{ mm} = 748.4 \text{ cm} \leq 1867 \text{ cm} \text{ pero no mayor que } 900 \text{ cm}$$

por lo tanto, usar  $L_b = 748.4 \text{ cm}$ , el cual se comparará con la separación utilizada en este caso de estudio, donde están colocados @ 500 cm, por lo tanto, se cumple.

Se procede a calcular el valor de la rigidez longitudinal  $K_g$  con la ecuación 3-2

$$K_g = n [ I + A e_g^2 ] = 86,116,206.01 \text{ cm}^4$$

$$\text{donde: } n = E_B / E_D = 8.03$$

$$E_B = E_s$$

$$E_D = E_c = 15,100 * \sqrt{f'c} = 261,539.67 \text{ Kg/cm}^2$$

$$A = 785.58 \text{ cm}^2$$

$$I = 4,361,915.30 \text{ cm}^4$$

$$e_g = 90 \text{ cm}$$

Utilizando la ecuación 3-1 se estima la deflexión al centro del claro que presentaron las vigas en este puente en estudio, Aquí se utilizó la carga aplicada en el ensaye:

Donde, para este caso:

$$P = 28,720 \text{ Kg}$$

$$L_{sc} = 2,989 \text{ cm}$$

$$Es = 2,100,000 \text{ Kg/cm}^2$$

$$R = 18,760 \text{ cm}$$

Sustituyendo:

$$\alpha = 1.5 - 0.00004 * 18760 + 0.000004 * 2989$$

$$\alpha = 0.7652$$

$$\Delta = \frac{28720 * 2989^4}{0.7376 * 2100000 * 86116206 * 18760}$$

Se obtiene la deflexión al centro del claro debida a las cargas vivas utilizadas en el ensaye de:

$$\Delta = 0.887 \text{ cm}$$



#### 5.4 Análisis de la estructura en estudio utilizando elementos finitos, programa SAP 2000 v 14

La estructura del puente en estudio se analizó utilizando el método de los elementos finitos SAP 2000. Para este ensaye se utilizó un camión de 3 ejes, con un peso total, ya cargado, de 28,720 Kg. En la figura 5.4.1 aparecen los datos del tren de carga utilizado.



Figura 5.4.1 Tren de carga del camión usado en el ensaye.

#### 5.5 Análisis de la estructura en estudio utilizando el entramado plano, programa STAAD Pro

Para el desarrollo del análisis de la estructura utilizando el método aproximado del **entramado plano** se utilizó el programa **STAAD Pro versión 2003**, analizando el claro en estudio con todos sus elementos. En la figura 5.5.1 aparece el modelo de análisis, las vigas se representan como un entramado plano, con los diafragmas conectados a las vigas de forma simple sin restringir los giros, sólo admiten cortantes. La losa de tráfico no aparece en el modelo de análisis y se consideró que la losa está simplemente apoyada entre las vigas, de tal forma que la carga se distribuye entre claros simplemente apoyados (lever rule) como lo recomienda AASHTO [1], para de esta forma colocar las cargas sobre las vigas principales para proceder al análisis.

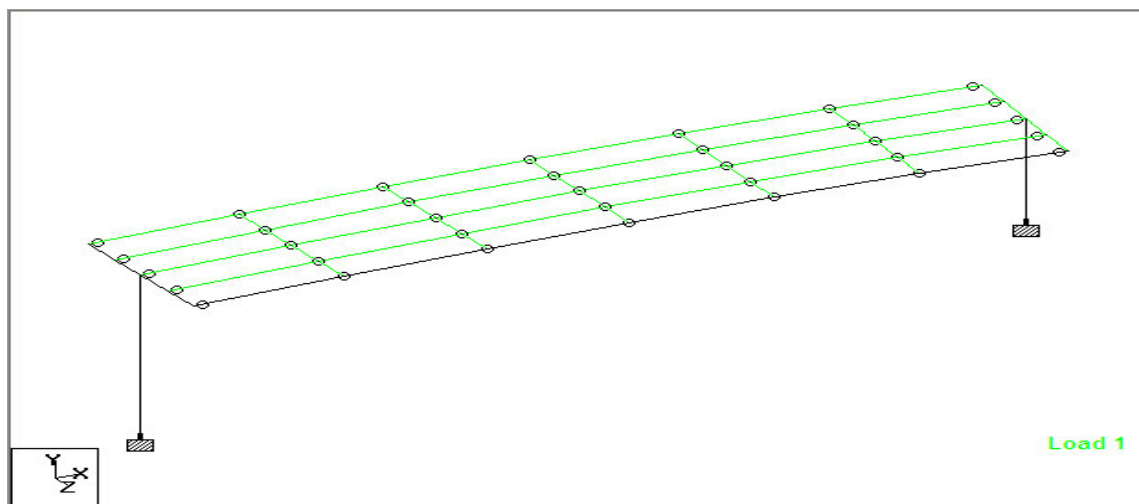


Figura 5.5.1 Modelo del puente usando el método del entramado plano.

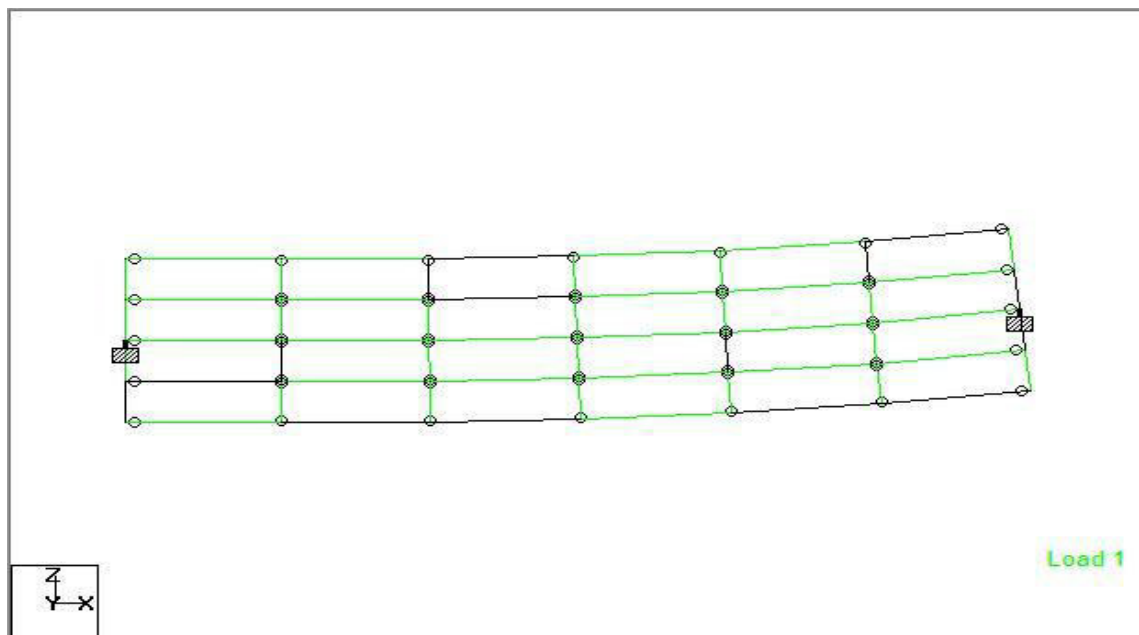


Figura 5.5.2 Vista en Planta del Modelo del puente usando el método del entramado plano.

El modelo de análisis del entramado plano se cargó con el camión utilizado en el ensaye, el cual es de 3 ejes, con un peso total, ya cargado, de 28,720 Kg,

que aparece en la figura 5.4.3. El modelo estructural incluyendo las cargas aparece en la figura 5.5.3.

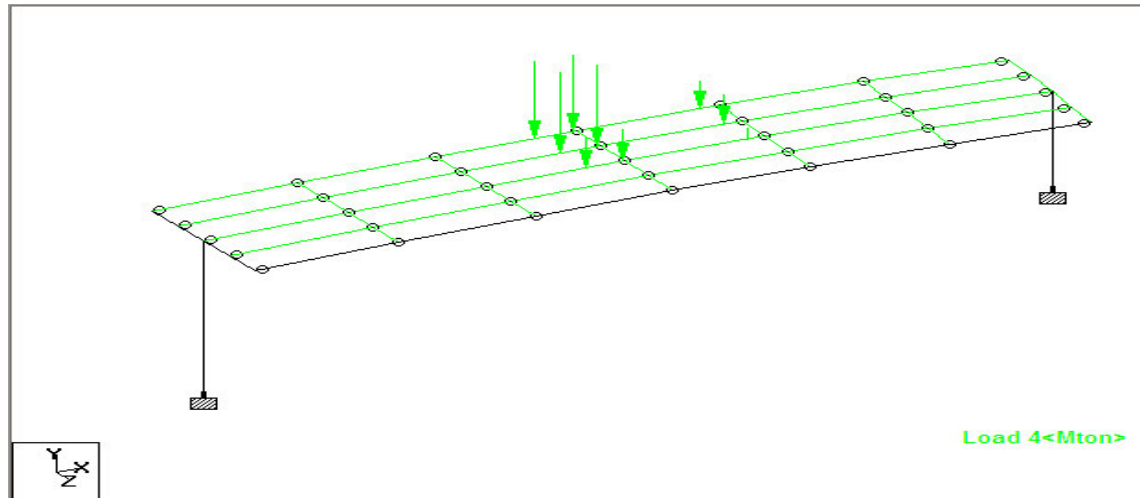


Figura 5.5.3 Modelo del entramado plano con el tren de cargas vivas del ensaye.

En los resultados del análisis de la estructura con este método, se puede apreciar que las cargas vivas están afectando principalmente a las tres vigas sobre las que se encuentra el camión del ensaye. Ver figura 5.5.4, donde aparecen graficados los momentos flexionantes en el eje principal de las vigas.

Así mismo, en la figura 5.5.5, aparecen graficados los esfuerzos en el eje principal de las vigas de la estructura, donde se aprecia que prácticamente sólo las tres vigas con las cargas vivas son las que están trabajando.

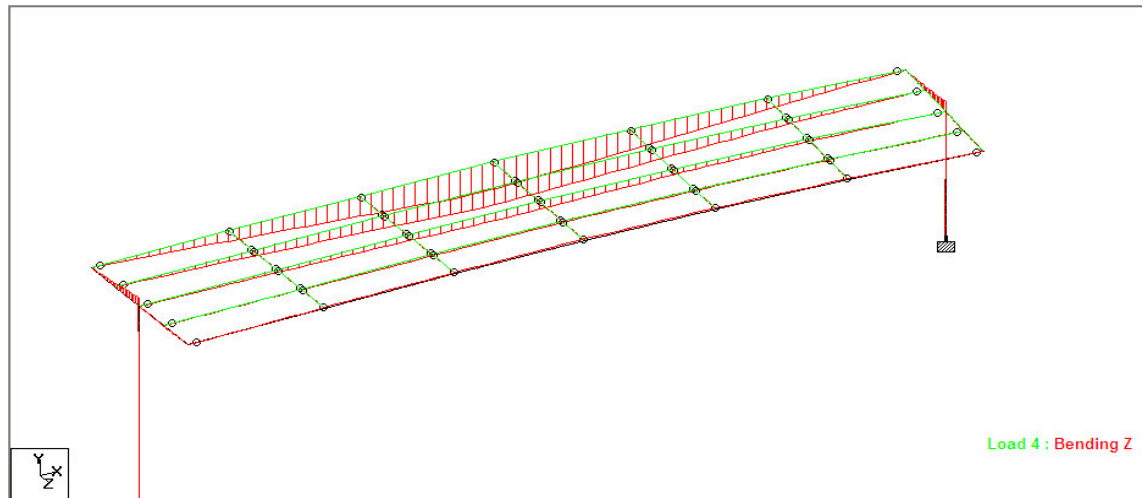


Figura 5.5.4 Momentos flexionantes en el eje principal de las vigas con el tren de cargas vivas del ensaye.

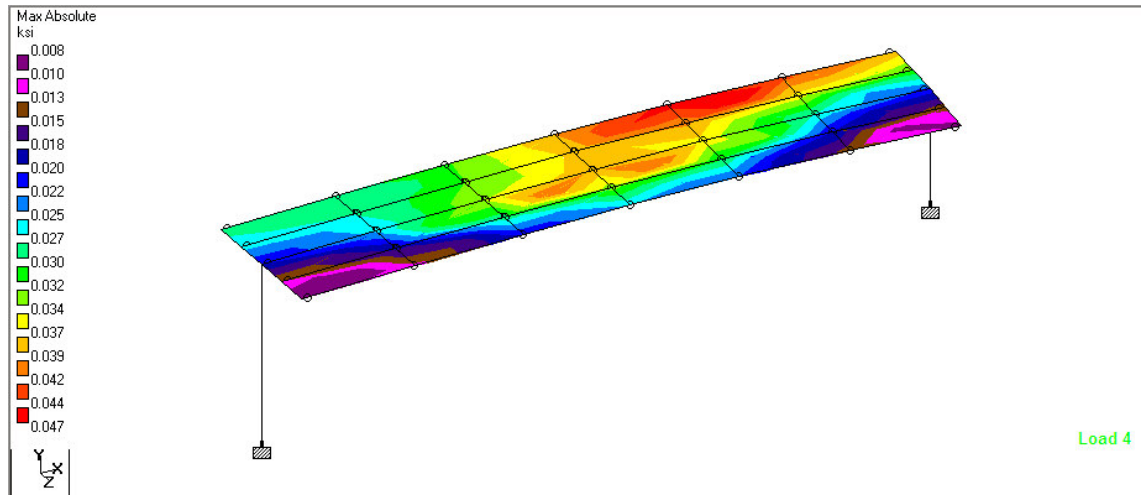


Figura 5.5.5 Esfuerzos en el eje principal de las vigas con el tren de cargas del ensaye.

En la figura 5.5.6 se aprecian las deflexiones, medidas en el eje principal de las vigas de la estructura. Nuevamente es notoria la ausencia de participación de las vigas donde no está actuando la carga del ensaye.

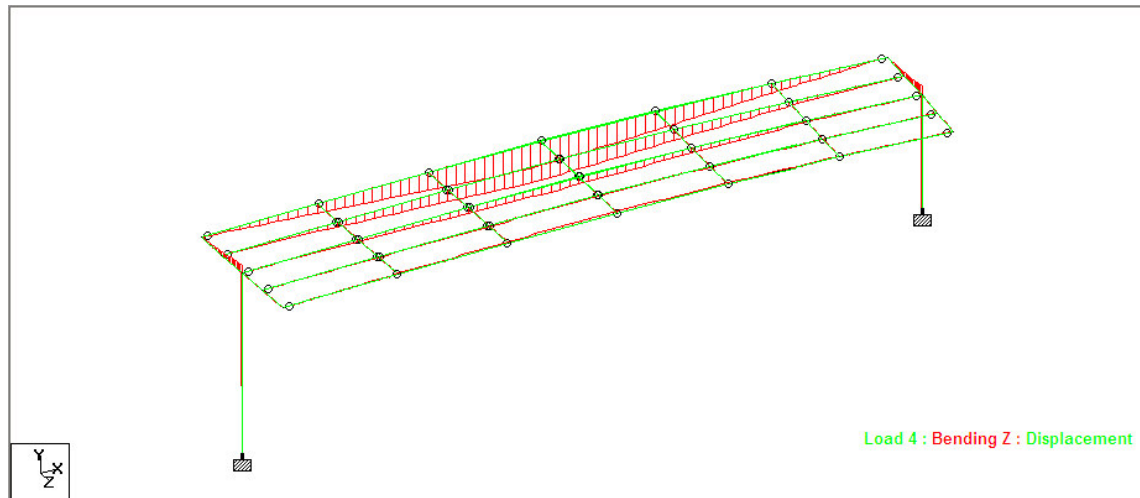


Figura 5.5.6 Deflexiones en el eje z debidas a la carga del ensaye.

## 5.6 Resumen de los resultados de la simulación experimental de la estructura en estudio.

En los análisis efectuados a la estructura en estudio se obtuvieron los siguientes resultados de deflexión, al centro del claro para la viga extrema V-20.

### Método de los elementos finitos con programa SAP 2000 v 14.

De los resultados del análisis, usando este método, se obtuvo que la deflexión máxima en la viga extrema V-20, al centro del claro tiene un valor de 3.73 mm, para la condición del vehículo del ensaye.

### Método del entramado plano usando el programa STAAD Pro.

De los resultados del análisis se obtuvo que la deflexión máxima en la viga extrema V-20 al centro del claro tiene un valor de 8.55 mm para la condición del vehículo del ensaye.

## **CAPÍTULO 6**

### **SIMULACIÓN EXPERIMENTAL**

#### **6.1 Introducción**

Como se mencionó en el capítulo anterior, el claro que se instrumentó fue el comprendido entre los ejes 4 y 5, que consta de 5 vigas principales, con una distancia entre ejes de 31.00 m. Se instrumentaron la viga exterior del lado externo de la curva y la siguiente viga hacia el interior, por ser las de mayor longitud.

Para llevar a cabo la prueba en este puente, actualmente en uso, las autoridades, tanto estatales como municipales, otorgaron los permisos correspondientes con la condición de que se interrumpiera el tráfico lo menos posible, ya que por la ubicación del puente, éste sirve de acceso a las

instalaciones del “Parque Fundidora”, donde por lo regular hay eventos recreativos y culturales prácticamente todos los días del año, por lo que sólo nos otorgaron una hora de un día domingo por la mañana para cerrar el tráfico en ese sitio para que se pudiera realizar el ensaye, limitando con ello la duración de las pruebas. Para la realización de las pruebas se contó con el apoyo del personal de Tránsito y de la Secretaría de Obras Públicas del municipio de Monterrey, Nuevo León.

## **6.2 Equipos adquisidores de los datos**

Para llevar a cabo las pruebas se utilizaron dos adquisidores de datos del Instituto de Ingeniería Civil. Uno de los equipos tiene 2 canales disponibles para tomar las mediciones y el otro tiene 16 canales disponibles.

Se instrumentó el total de los canales disponibles utilizando un LVDT para medir las deflexiones en la viga extrema exterior, viga V-20, y el resto fueron galgas extensiométricas (strain gage). En el apartado 6.4 se mostrarán los dibujos con la ubicación de las galgas, cuyo objetivo era obtener las lecturas que se utilizaron para calcular las deformaciones en las vigas después de la aplicación de las cargas vivas en diferentes posiciones, a lo largo y el ancho del puente, que servirán para futuros reportes de investigación.

El adquisidor Modelo P3 Strain Indicator and Recorder versión 1.02 de Vishay Micro-Measurements, tiene dos canales disponibles para la toma de lecturas. Se muestra en la figura 6.2.1.



Figura 6.2.1 Adquisidor de datos de 2 canales, Modelo P3  
versión 1.02 de Vishay Micro Measurements.

El otro adquisidor de datos es de la firma National Instruments, que usa la plataforma SCXI, por medio de bus USB, modulo: SCXI 1600, y tiene una capacidad para 16 canales.

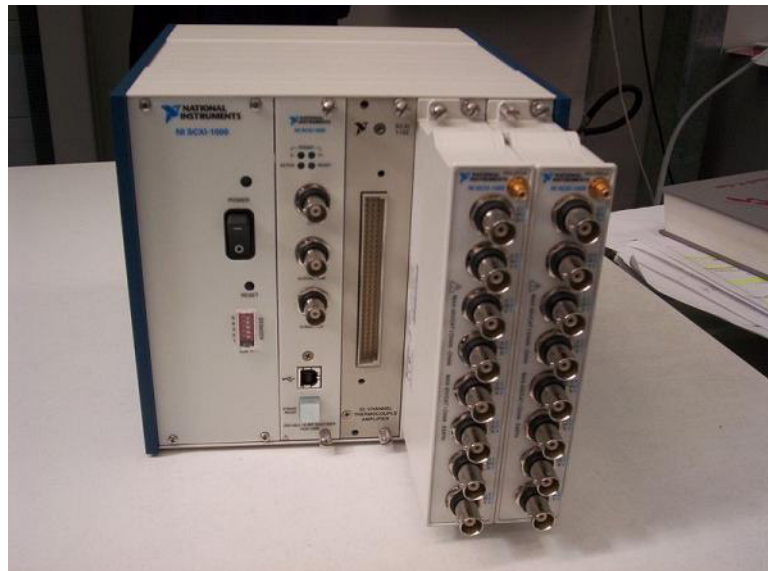


Figura 6.2.2 Adquisidor de datos de 16 canales, de  
National Instruments SCXI 1600.



La estructura se instrumentó colocándole 15 galgas extensiométricas (strain gages) en dos vigas y una LVDT al centro del claro en la viga exterior para medir las deflexiones. Las galgas extensiométricas se conectaron al módulo SCXI-1520, con accesorio SCXI-1314, configurado con una resistencia nominal de  $120\ \Omega$ , cuarto de puente tipo I, y el LVDT se conectó al módulo SCXI-1520 con accesorio SCXI-1314 configurado con una resistencia nominal de  $350\ \Omega$  a puente completo. La frecuencia de muestreo fue de 1kmuestra/segundo.

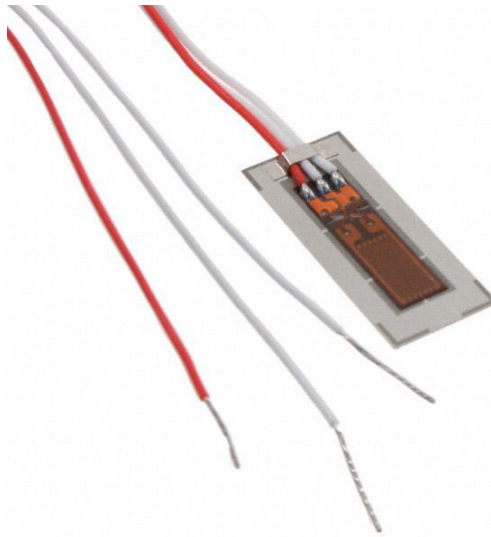


Figura 6.2.3. Galga extensiométrica ("strain gage").

Las galgas extensiométricas utilizadas fueron de modelo CEA-06-250UN-350 de Vishay Micro Measurements. Estas son de uso general, con un intervalo de deformaciones de  $\pm 3\%$ . Son para uso en acero estructural y son auto-compensadas por temperatura.

Adicionalmente, con el adquisidor Modelo P3 Strain Indicator and Recorder versión 1.02 de Vishay Micro-Measurements, se conectaron dos galgas extensiométricas. Este adquisidor es el que se utiliza regularmente para las prácticas de laboratorio de los estudiantes de licenciatura de la Facultad de Ingeniería Civil, por lo que el personal del Departamento de Estructuras está

muy familiarizado con su funcionamiento y se utilizó como comprobación en campo de las lecturas tomadas por el adquisidor SCXI 1600.

Para la comprobación se colocaron en la viga extrema en el centro del claro en el patín inferior de la viga dos galgas. Del lado exterior una galga conectada al SCXI 1600 y la del lado interior la otra galga, conectada al P3. De esta forma las lecturas de ambos equipos deben ser prácticamente iguales.



Figura 6.2.4. Comprobación de lecturas en ambos adquisidores.

### **6.3 Calibración del equipo**

Antes de realizar las pruebas en el puente se procedió a la calibración del equipo de adquisición de datos, realizando pruebas en el laboratorio del Instituto de Ingeniería Civil, en unas muestras de acero estructural proporcionadas por el fabricante de las vigas del puente, y que eran del mismo tipo y calidad del acero utilizado en la fabricación de las vigas del mismo.

El esquema de la calibración del equipo se muestra en la siguiente figura, y todo el proceso de calibración del equipo, que fue efectuado en el Instituto de Ingeniería Civil, aparece en forma gráfica en el **Apéndice A**.

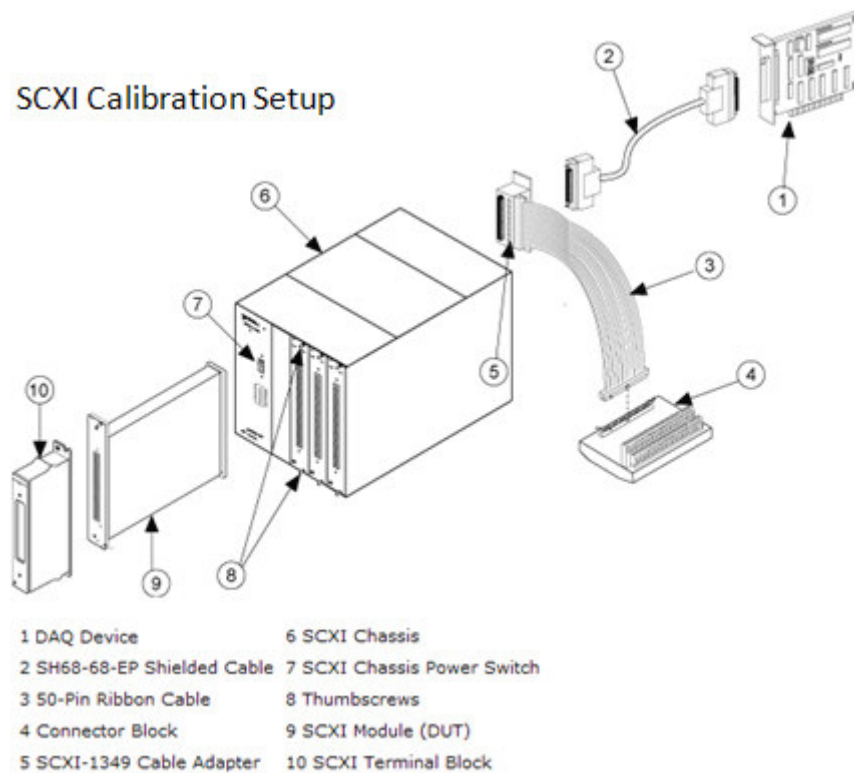


Figura 6.3.1. Esquema de calibración del equipo SCXI 1600.

El procedimiento para la calibración del equipo en términos generales, fue el siguiente:

1. Se prepararon en el laboratorio las galgas extensiométricas (strain gage).



Figura 6.3.2 Preparación de los strain gages.

2. Se realizaron las conexiones de los cables de las galgas a la tarjeta del equipo adquirente de datos SCXI 1600, en los canales adecuados, de acuerdo con el programa computacional que elaboró la MC Ing Tania Lozoya, para el equipo adquirente de datos SCXI 1600 de National Instruments.

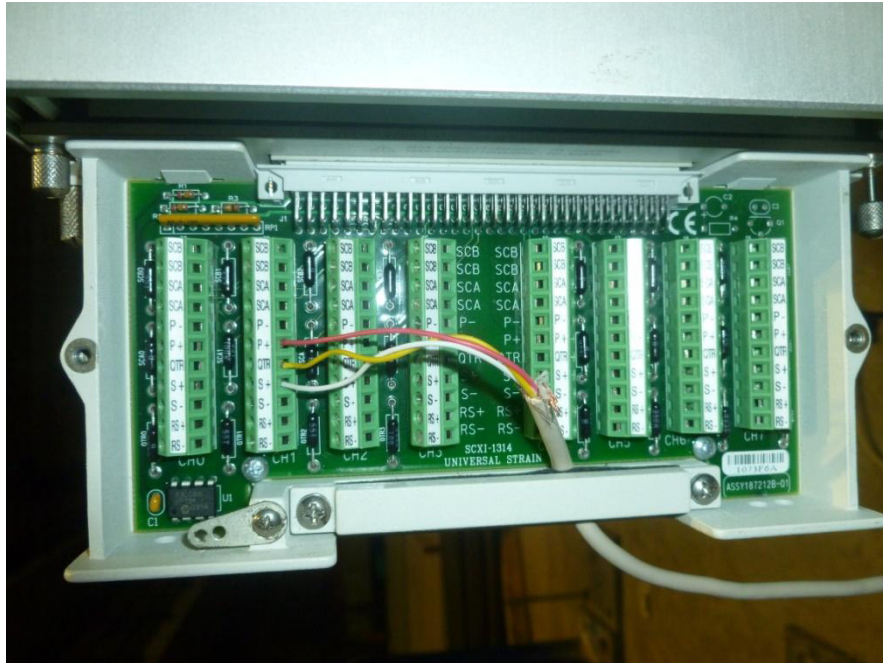


Figura 6.3.3 Conexión del strain gage a la tarjeta del adquisidor SCXI 1600.

3. Se procedió a conectar el strain gage en la probeta de acero



Figura 6.3.4 Conexión del strain gage a la probeta de acero.



4. Se procedió a colocar la probeta en la maquina universal y se le aplicó carga a tensión, tomándose lecturas de la carga en la máquina universal y comparándolas con las obtenidas en el adquisidor de datos. Para esto, anteriormente se elaboró un programa que relaciona las lecturas de las galgas con las deformaciones de la probeta.

5. Similarmente se hizo la calibración del LVDT, utilizando un marco de carga.



Figura 6.3.5 Prueba de la probeta en la maquina universal.

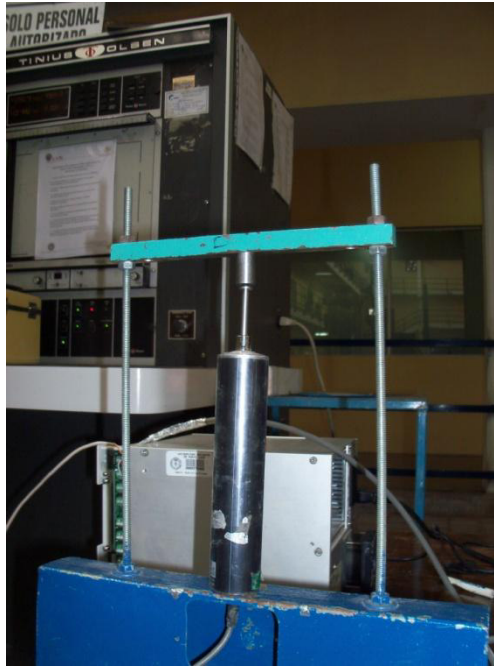


Figura 6.3.6 Calibración del LVDT.

En el **Apéndice A** se presenta, de forma gráfica y fotográfica, todo el proceso de calibración de los adquisidores de datos.

## **6.4 Ubicación y colocación de las galgas extensiométricas**

### **6.4.1 Antecedentes**

Para la instrumentación de la estructura se consultó una gran variedad de estudios elaborados en estructuras existentes actualmente en servicio, otras en reconstrucción y algunas elaboradas en un ambiente de laboratorio en modelos a escala. Adicionalmente se visitó el Departamento de Estructuras de la Universidad de Texas en Austin, de donde se obtuvo información acerca de los trabajos de investigación, que sobre el tema de puentes, han llevado a cabo y que actualmente están elaborando en coordinación con el Departamento del Transporte de Texas.

De las investigaciones recientes, se mencionan algunas de donde se obtuvo información sobre la ubicación de los deformímetros, su posición, velocidades utilizadas para el vehículo del ensaye, los pesos y vehículos utilizados en los ensayes, así como otros detalles menores pero no menos importantes para llevar a cabo este ensaye a escala natural de un puente curvo de acero.

En 1992 la Administración Federal de Carreteras FHWA, inició una serie de experimentos a gran escala para el Proyecto de Investigación de Puentes Curvos de Acero CSBRP, por sus siglas en el idioma inglés. Estos trabajos fueron desarrollados por el Dr. Daniel G. Linzell et al. 1997 [19] y consistían en probar un claro de puente formado por tres vigas curvas de acero concéntricas, de radios 58.29, 60.96 y 63.63 m (191.25, 200 y 208.75 ft), con claro central de 27.43 m (90 ft) medida sobre la longitud de la curva central. El objetivo principal de estas investigaciones fue desarrollar nuevas guías de diseño de este tipo de estructuras.

Para el otoño de 2000 el Dr. Daniel G. Linzell [25] y un grupo de investigadores del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Estatal de Pennsylvania, en asociación con la I-99 Advanced Technology Test Bed, ensayaron dos puentes de acero curvos desde su etapa de construcción hasta su etapa de operación. El primer puente es de 6 claros, con una longitud total de 530 m y con un radio de curvatura promedio de 592 m. El segundo es de 2 claros, con una longitud total de 146 m y con un radio de curvatura promedio de 586 m.

En el estado de Pennsylvania, Brett A. McElwain, et al. 2000 [13] ensayaron 3 puentes curvos de acero, de uno, dos y tres claros respectivamente, donde el propósito de su investigación era estudiar la tolerancia a cargas dinámicas, los factores de distribución de momentos en las vigas y la efectividad de los modelos de entramados para este tipo de puentes.



La investigación de Dan P. Krzmarzick, et al. 2006 [14] llevada a cabo por la Universidad de Minnesota y el Departamento del Transporte de Minnesota incluyó el ensaye para cargas estáticas y dinámicas de un puente curvo de acero de 5 claros continuos, con 2 vigas por claro, en esta investigación se midieron las deformaciones y desplazamientos en las vigas durante los ensayes, con la finalidad de investigar el comportamiento y la calificación de estos puentes a través de pruebas de carga con camiones pesados

En el estado de Texas en 2009, Amy Elizabeth Barrett realizó la investigación del Puente de la autopista interestatal I-35, ubicado en la ciudad de Dallas, Texas, como parte de su trabajo de tesis [7] para estudiar la aparición, de manera continua, de fisuras en la losa de tráfico del puente. Para ello se hicieron pruebas con carga viva de peso conocido, y pruebas con el tráfico liberado en el puente.

El trabajo de tesis de J. J. Hoffman [26] elaborado en 2013 en la Universidad Estatal de Iowa, en conjunto con el Departamento del Transporte de Iowa, consistió en la investigación experimental y analítica de cuatro puentes curvos de acero con apoyos integrales y semi-integrales. Los puentes estaban formados por 4 vigas en su sección transversal, con claros de 24.38 a 46.33 m (80 ft a 152 ft). El objetivo de ese trabajo fue monitorear y evaluar el comportamiento de las estructuras a corto y largo plazo.

#### **6.4.2 Ubicación de las galgas y el LVDT en el caso en estudio**

En este caso en estudio se instrumentaron las vigas V-19 y V-20, siguiendo la nomenclatura de los planos de construcción del puente, que corresponden a una trabe interior, la V-19, y a la trabe extrema V-20, localizada en el lado exterior de la curva. Ver figura 6.4.2.1.

Las galgas se colocaron en los siguientes sitios:

Tabla 6.4.2.1 Ubicación de galgas en viga interior V-19.

Galga No.	Ubicación	Posición
1	Alma	Sobre apoyo y a 1" del patín inferior
4	Alma	Sobre apoyo y a la mitad de la altura de la viga
6	Alma	Sobre diafragma y a la mitad de la altura de la viga
12	Alma	Al centro del claro y a 1" del patín inferior
5	Alma	Al centro del claro y a la mitad de la altura de la viga
10	Patín	Al centro del claro en el patín del lado interior de curva
9 *	Patín	Al centro del claro en el patín del lado exterior de curva

Nota: \* esta galga se conectó al Adquisidor P3.



Figura 6.4.2.1 Ubicación de strain gage en patines de vigas V-19 y V-20.

Tabla 6.4.2.2 Ubicación de galgas en viga exterior V-20.

Galga No.	Ubicación	Posición
2	Alma	Sobre apoyo y a 1" del patín inferior
3	Alma	Sobre apoyo y a la mitad de la altura de la viga
7	Alma	Sobre diafragma y a la mitad de la altura de la viga
8	Alma	Sobre diafragma y a 1" del patín inferior
11	Alma	Al centro del claro y a la mitad de la altura de la viga
15	Alma	Al centro del claro y a 1" del patín inferior
13 *	Patín	Al centro del claro en el patín del lado interior de curva
14	Patín	Al centro del claro en el patín del lado exterior de curva
LVDT	Patín	Al centro del claro

Nota: \* esta galga se conectó al Adquisidor P3.

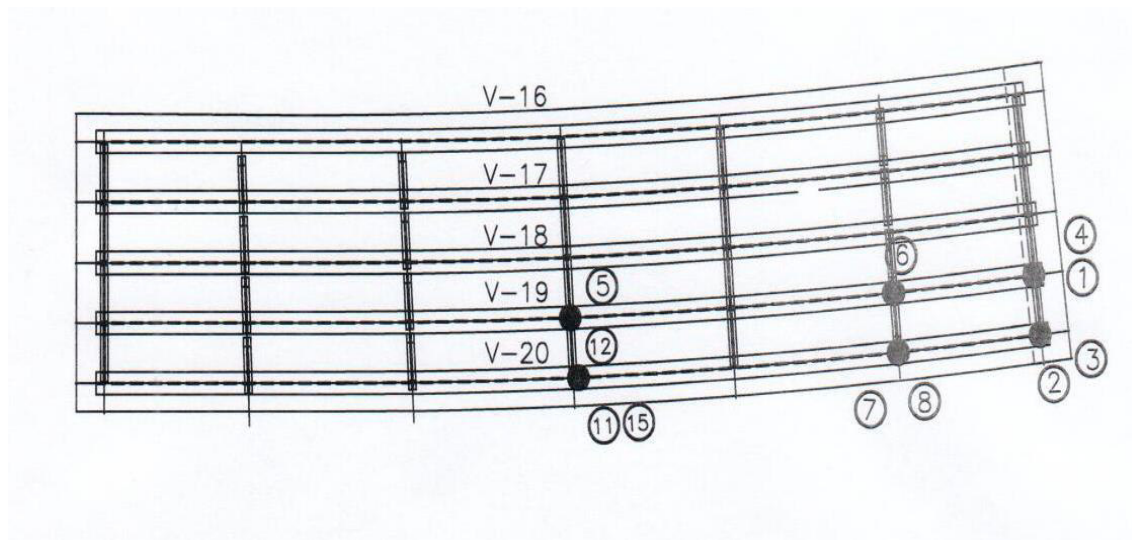


Figura 6.4.2.2 Ubicación de strain gage en el alma de vigas V-19 y V-20.

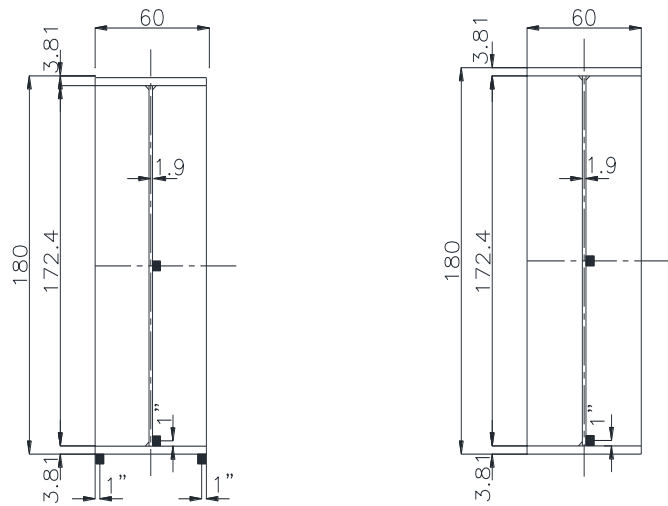


Figura 6.4.2.3 Ubicación de strain gage en la sección transversal de viga V-20.

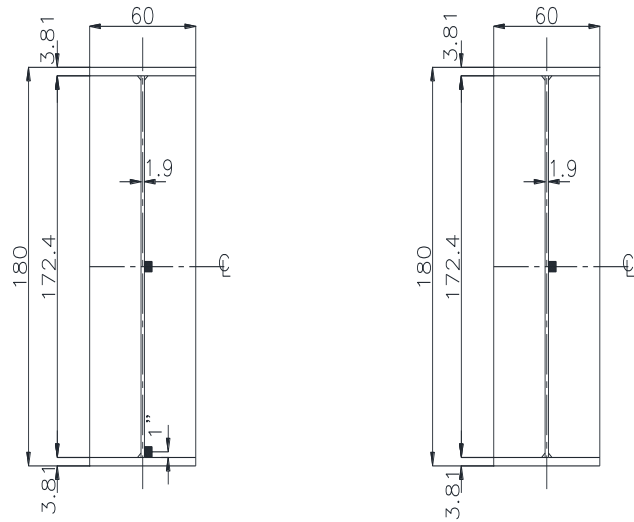


Figura 6.4.2.4 Ubicación de strain gage en la sección transversal de viga V-19.

## 6.5 Pruebas en el caso en estudio

El procedimiento del ensaye se hizo de manera similar a las investigaciones recientes en puentes a escala natural, llevadas a cabo por Jerad James Hoffman [26] en la Universidad Estatal de Iowa, Amy Elizabeth Barrett [7] en la Universidad de Texas en Austin y Daniel G. Linzell [19] [25] en la Universidad Estatal de Pennsylvania, entre otros y, en términos generales, se llevó la siguiente secuencia:

- 1.- Se prepararon en el laboratorio las galgas extensiométricas dos semanas antes de la fecha de realización de la prueba.
- 2.- Dos días antes de la prueba se colocaron las galgas ya preparadas en las vigas V-19 y V-20 en la ubicación y orientación correspondiente.

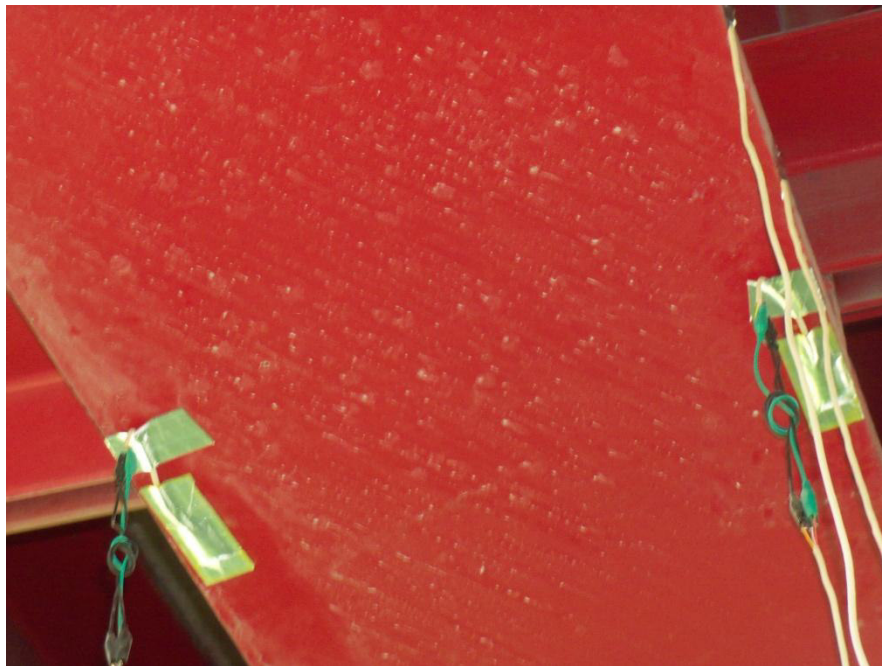


Figura 6.5.1 Instalación de los strain gages en las vigas de prueba.

- 3.- El día del ensaye se realizaron las actividades listadas a continuación:

4.- Se instaló el LVDT utilizando andamios y dispositivos de fijación para evitar su movimiento.



Figura 6.5.2 Instalación del LVDT en el campo.

5.- Se conectaron los cables de cada galga y del LVDT a las tarjetas de los adquisidores de datos.





Figura 6.5.3 Conexión de strain gages a los adquisidores de datos.

6.- Una vez conectados los cables de las galgas y el LVDT a los adquisidores de datos, se cerró el puente al tráfico vehicular.



Figura 6.5.4 Prueba de conexión de los “strain gages” a los adquisidores de datos.

7.- Se tomó la lectura del “cero” con el puente sin carga viva, 5 minutos después de cerrarlo al tráfico vehicular, tomando las lecturas con ambos adquisidores.

8.- Para la prueba se contó con un camión de tres ejes, cargado con arena, que fue facilitado por la Constructora Maíz Mier, S.A.. Se tomaron todas las medidas longitudinales y transversales a los ejes del camión.

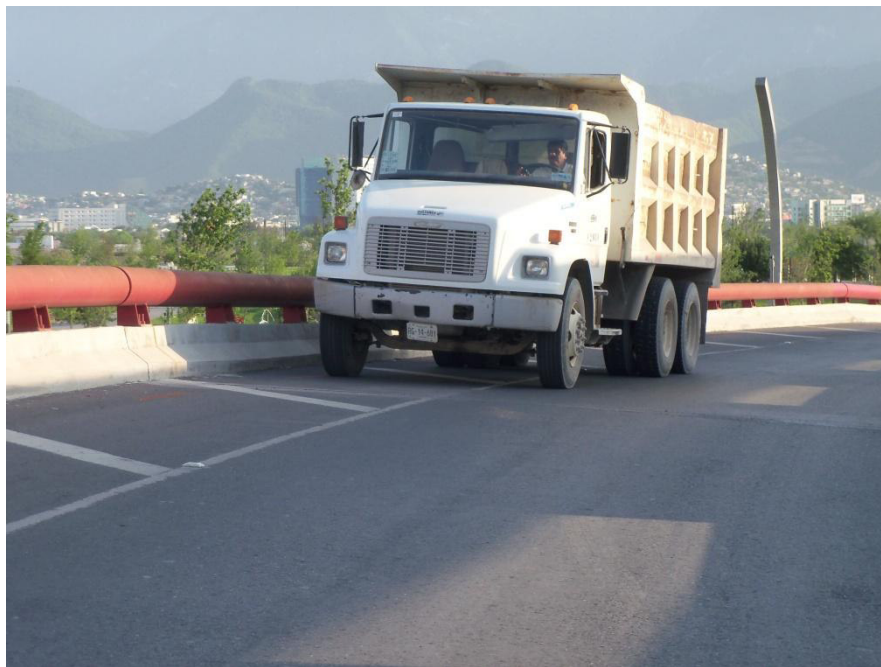


Figura 6.5.5 Prueba con el camión del ensaye.

9.- Se colocó el camión de tres ejes, ya cargado con arena, en la posición de la carga; transversalmente a 60 cm del borde del parapeto y longitudinalmente colocado al centro del claro del puente. Se constataron las lecturas de los 2 adquisidores en las galgas 13 y 14, para la viga interior V-19, y las galgas 9 y 10 para la viga exterior V-20, las que fueron prácticamente iguales, con una diferencia menor que el 0.5 %.



10.- Una vez que se verificaron las lecturas en los adquisidores, se retiró el camión, y se volvieron a tomar lecturas del “cero” con el puente sin carga viva, 5 minutos después de retirar el camión del puente.

11.- Posteriormente se ejecutó la prueba, que consistió en hacer pasar el camión 6 veces por la misma posición: transversalmente a 60 cm del borde del parapeto, siguiendo la recomendación del artículo 3.6.1.3.1 del reglamento AASHTO [1]. La velocidad del vehículo durante la prueba fue de entre 10 y 20 Km/hr, siguiendo las recomendaciones de [7].



Figura 6.5.6 Verificando la trayectoria del camión durante el ensaye.

12.- Dentro de esas 6 pruebas también se dejaba sin movimiento el camión durante un lapso de 1 a 3 minutos, colocado longitudinalmente al centro del claro del puente.

13.- Una vez terminada la lectura de los datos de la prueba, se procedió a abrir al tráfico vehicular del puente y a llevar a una báscula pública el camión del ensaye, para obtener los pesos por eje.

En el **Apéndice B**, se muestra toda la secuencia fotográfica del ensaye realizado en la estructura en estudio.

## 6.6 Resultados de las pruebas en el puente

Las lecturas que tomó el adquisidor fueron, en este caso, de 1000 lecturas/segundo, el equipo SCXI 1600, tiene la opción de exportar los datos a Excel. Los archivos de las lecturas se trabajaron con los filtros recomendados por “National Instruments” para eliminar las señales de ruido, debidas principalmente a corrientes parásitas.

Ya una vez filtrados los datos de las lecturas en archivos de Excel, se presentaron los resultados de los 6 ensayos, en forma gráfica, para la viga exterior V-20 y para la viga V-19, empezando por las lecturas del LVDT, que indicó la deflexión al centro del claro de la viga exterior V-20. Los resultados de las lecturas del LVDT aparecen en la figura 6.6.1.

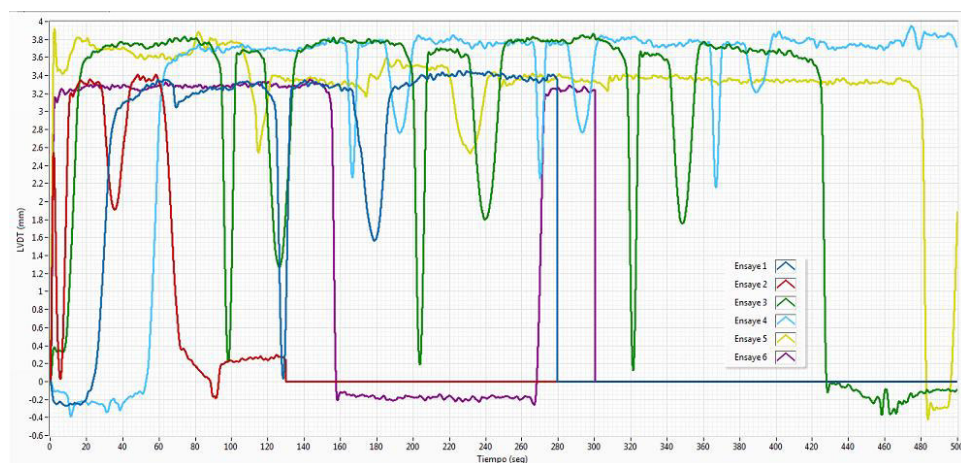


Figura 6.6.1 Deflexión al centro del claro medida en la viga exterior V-20.

Las figuras 6.6.2. y 6.6.3. muestran los resultados de las lecturas en el alma de la pieza medidos sobre el apoyo de la viga exterior V-20, obtenidos de la galga No 2, ubicada en el alma a 1" del patín inferior, y la galga No 3, colocada a la mitad de la altura de la viga.

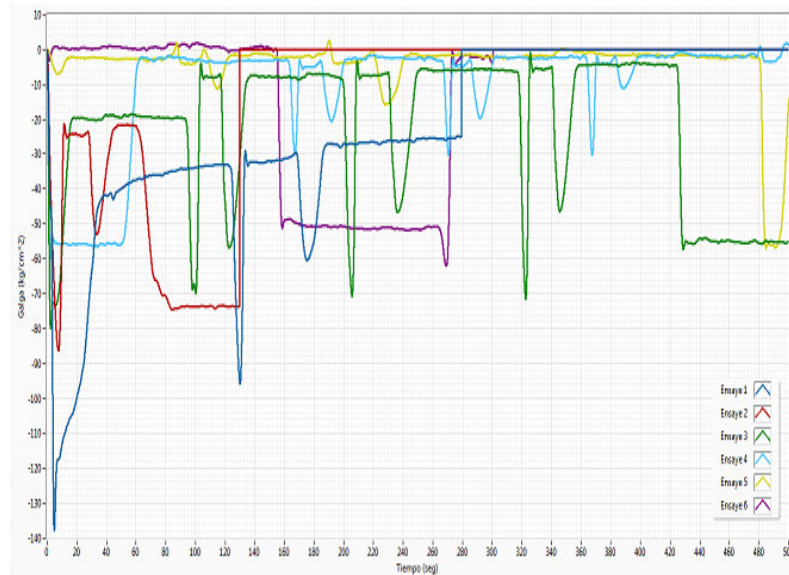


Figura 6.6.2 Resultados de la galga No 2, colocada sobre el apoyo en la parte inferior del alma de la viga exterior V-20.

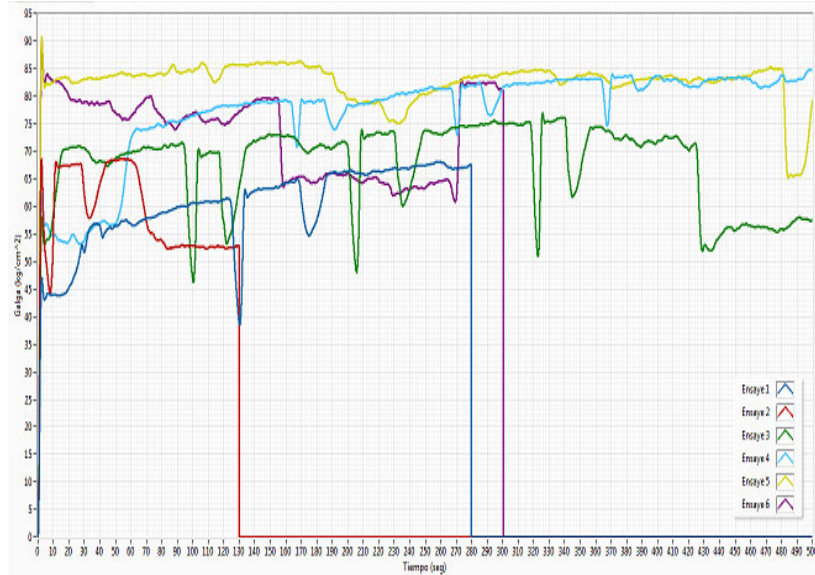


Figura 6.6.3 Resultados de la galga No 3, colocada sobre el apoyo en la mitad de la altura del alma de la viga exterior V-20.

La figura 6.6.4 muestra los resultados obtenidos de la galga No 7, colocadas a un lado del diafragma, a la mitad de la altura del alma de la viga exterior V-20. La galga No 8, colocada en el alma de la viga exterior V-20, a un lado del diafragma y a 1" del patín, no arrojó lecturas satisfactorias.

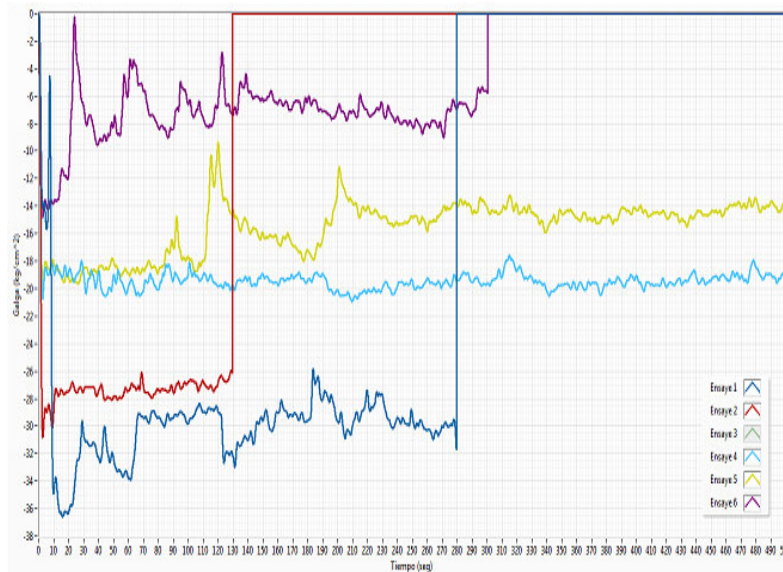


Figura 6.6.4 Resultados de la galga No 7, colocada a un lado del diafragma a la mitad de la altura del alma de la viga exterior V-20.

La figura 6.6.5 muestra los resultados obtenidos de la galga No 11, colocada al centro del claro y a la mitad de la altura del alma de la viga exterior V-20. La galga No 15, colocada en el alma de la viga exterior V-20, en el centro del claro y a 1" del patín no arrojó lecturas satisfactorias.

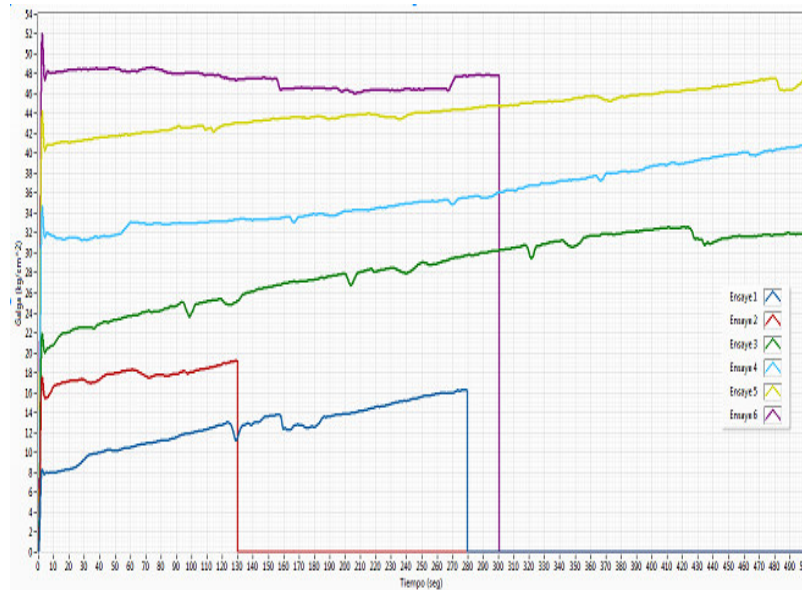


Figura 6.6.5 Resultados de la galga No 11, colocada al centro del claro y a la mitad de la altura del alma de la viga exterior V-20.

La figura 6.6.6 muestra los resultados obtenidos de la galga No 14, colocada al centro del claro en el patín del lado exterior de la curva en la viga exterior V-20. La galga No 13, colocada en el patín del lado interior de la viga exterior V-20, en el centro del claro, estaba conectada al adquisidor P-3, y por error se estuvieron sobre-escribiendo las lecturas de los 6 ensayos, de tal forma que, al fin, sólo quedó una lectura, por lo que no se presentan los resultados de esa galga.





Figura 6.6.6 Resultados de la galga No 14, colocada al centro del claro en el patín de la viga exterior V-20, lado exterior de la curva.

En la figura 6.6.7 se muestra el comportamiento de la galga No. 1, colocada sobre el apoyo en el alma de la viga interior V-19 y localizada en la parte inferior del alma, mientras que en la figura 6.6.8 se aprecia el comportamiento de la galga No. 4, también colocada sobre el apoyo de la viga interior V-19, pero localizada a la mitad de la altura del alma.

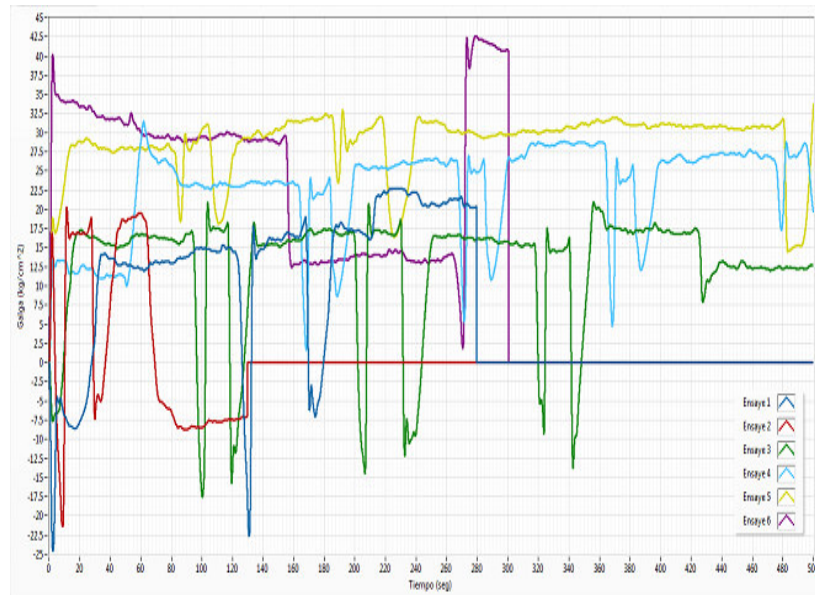


Figura 6.6.7 Resultados de la galga No 1, colocada sobre el apoyo en la parte inferior del alma de la viga interior V-19.

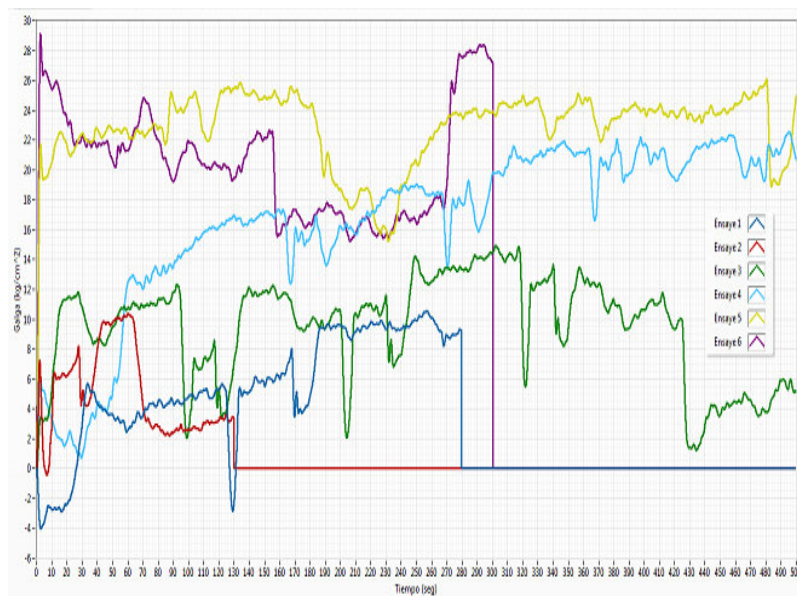


Figura 6.6.8 Resultados de la galga No 4, colocada sobre el apoyo en la mitad de la altura del alma de la viga interior V-19.

La galga No 6, colocada a un lado del diafragma en la mitad de la altura de la viga no dio lecturas satisfactorias; de hecho, durante el ensaye en el campo, al inicio de la toma de la lectura en “ceros” dio muestras de estar haciendo un falso contacto, ya que tomaba algunas lecturas en pequeños lapsos, por lo que se desecharon sus resultados.

La figura 6.6.9 corresponde a los resultados medidos durante los ensayos de la galga No 5 ubicada al centro del claro de la viga y a la mitad de la altura del alma. La figura 6.6.10 muestra los resultados de las lecturas en el alma de la pieza medidos al centro del claro por la galga No 12, colocada a la mitad de la altura de la viga. Ambas galgas corresponden a la viga interior V-19.

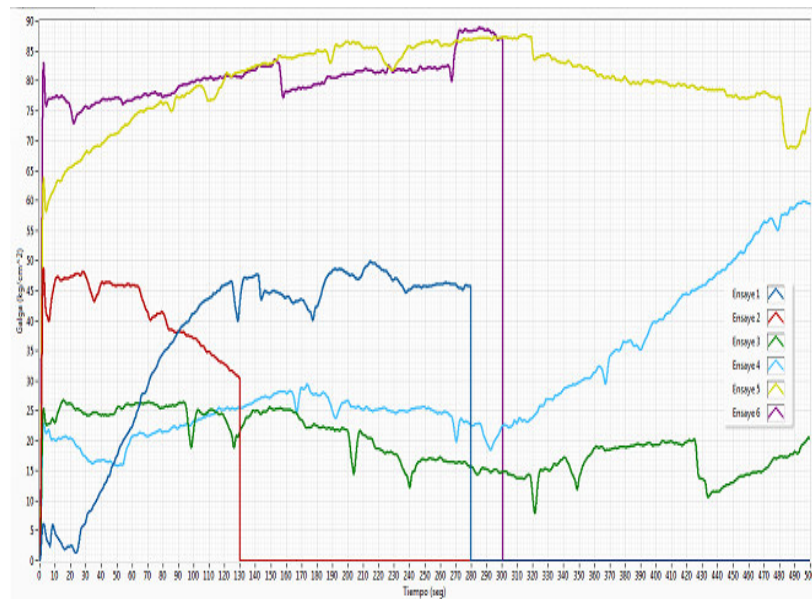


Figura 6.6.9 Resultados de la galga No 5, colocada al centro del claro en la mitad de la altura del alma de la viga interior V-19.



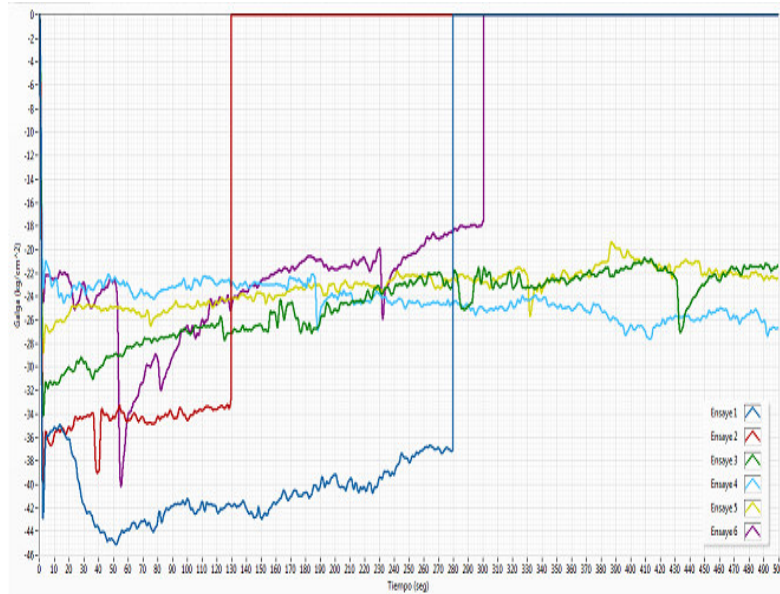


Figura 6.6.10 Resultados de la galga No 12, colocada al centro del claro en la parte inferior del alma de la viga interior V-19.

La figura 6.6.11 muestra los resultados obtenidos de la galga No 10, colocada al centro del claro, en el patín del lado interior de la curva, en la viga interior V-19. La galga No 9, colocada en el patín del lado exterior de la viga interior V-19, en el centro del claro, estaba conectada al adquisidor P-3, y por error se estuvieron sobre-escribiendo las lecturas de los 6 ensayos, de tal forma que, al fin, sólo quedó una lectura, por lo que no se presentan los resultados de esa galga.

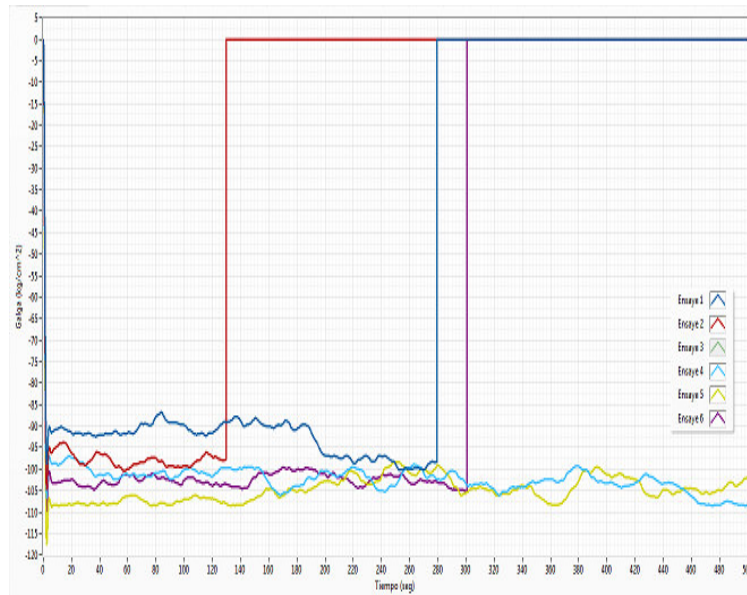


Figura 6.6.11 Resultados de la galga No 10, colocada al centro del claro, en el patín de la viga interior V-19, lado interior de la curva.

## 6.7 Resumen de los resultados de la simulación experimental

En un resumen de las lecturas máximas observadas en las galgas se observa lo siguiente:

Primero se tabularon y graficaron los resultados obtenidos de las lecturas de las galgas ubicadas en el alma de las vigas V-20 y V-19.

Tabla 6.7.1 Esfuerzo en el alma de la viga exterior V-20.

Ubicación	Parte inferior del alma (Kg/cm <sup>2</sup> )	A la mitad de la altura del alma (Kg/cm <sup>2</sup> )
Apoyo	-138	+90
A un lado del diafragma	No se obtuvo	-36.5
Al centro del claro	No se obtuvo	+52

Adicionalmente, con la deformación medida en el patín de la viga, se leyó un esfuerzo de  $+90 \text{ Kg/cm}^2$ .

Graficando las deformaciones de las vigas con su signo, se apreció que la viga se estaba torciendo a lo largo de su eje. Lo anterior quedó de manifiesto con los cambios de signo en las mediciones de deformaciones en el alma y el patín de la viga, graficando las secciones transversales de la viga exterior V-20. Ya deformada quedó como se ilustra en la figura 6.7.1.

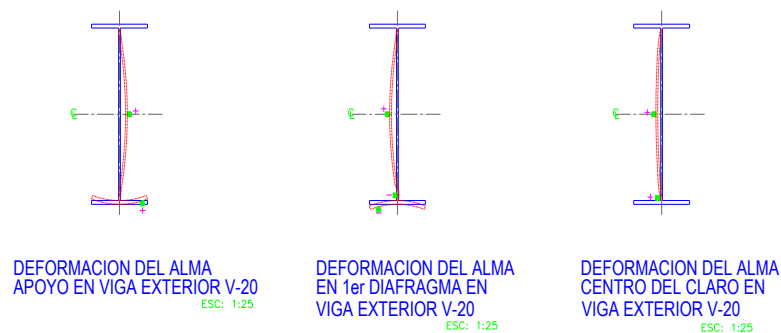


Figura 6.7.1 Deformaciones del alma en la viga exterior V-20, a lo largo de su eje.

Similarmente, de las galgas ubicadas en el alma de la viga interior V-19 se tiene:

Tabla 6.7.2 Esfuerzos en el alma de la viga interior V-19.

Ubicación	Parte inferior del alma (Kg/cm <sup>2</sup> )	A la mitad de la altura del alma (Kg/cm <sup>2</sup> )
Apoyo	+42.5	+29
A un lado del diafragma	No se instrumentó	No se obtuvo
Al centro del claro	-45	+88

Adicionalmente, con la deformación medida en el patín de la viga, se leyó un esfuerzo de  $-117 \text{ Kg/cm}^2$ .

Graficando las deformaciones de las vigas con su signo, se apreció que la viga se estaba torciendo a lo largo de su eje, lo cual quedó de manifiesto con el cambio de signo en las deformaciones del alma y el patín. En la figura 6.7.2 se aprecian las deformadas de las secciones transversales de la viga interior V-19.

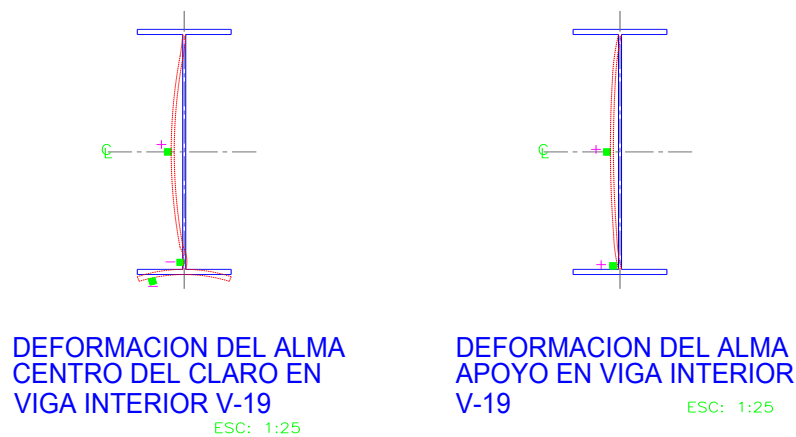


Figura 6.7.2 Deformaciones del alma en la viga interior V-19 a lo largo de su eje.

Las deflexiones verticales medidas en el ensaye, utilizando el LVDT, aparecen en la siguiente figura 6.7.3 donde se indica el intervalo de las lecturas máximas observadas, dentro de un intervalo de 3.95 a 3.35 mm, tomando un promedio simple de 3.65 mm, de deflexión, al centro del claro para la viga exterior V-20.

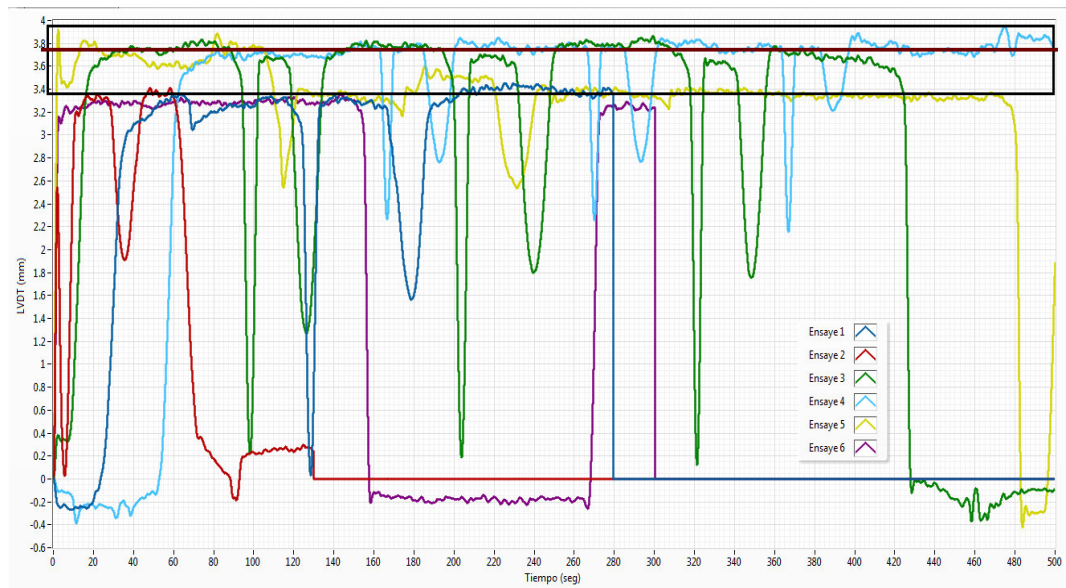


Figura 6.7.3 Intervalo de deflexiones al centro del claro, medidas en la viga exterior V-20.

## **CAPÍTULO 7**

### **ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

#### **7.1 Comparación de los resultados de la ecuación propuesta, versus los resultados de la simulación numérica de las doce estructuras**

El coeficiente  $\alpha$  de la ecuación propuesta 3-1 para la estimación de las deflexiones, fue ajustado con base en los resultados de la simulación numérica, y se propuso de tal forma que esté en función de los radios de curvatura y las longitudes de los puentes.

En la tabla 7.1.1 se muestran los resultados de la deflexión estimada utilizando la ecuación propuesta 3-1 y los obtenidos en las 12 estructuras analizadas, utilizando elementos finitos, variando los radios de curvatura y las longitudes de las estructuras, todas sujetas al tren de carga IMT 66.5.

Tabla 7.1.1 Comparación de las deflexiones, utilizando la ecuación propuesta 3-1 y las obtenidas por el programa SAP 2000.

Estructura	Deflexión (cm)	Deflexión (cm)
	usando Ec 3-1	con SAP 2000
Puente con Radio = 125 m y Lsc = 20 m	0.47	0.51
Puente con Radio = 125 m y Lsc = 25 m	1.14	1.15
Puente con Radio = 125 m y Lsc = 30 m	2.35	2.18
Puente con Radio = 150 m y Lsc = 20 m	0.43	0.49
Puente con Radio = 150 m y Lsc = 25 m	1.05	1.11
Puente con Radio = 150 m y Lsc = 30 m	2.18	2.10
Puente con Radio = 175 m y Lsc = 20 m	0.42	0.48
Puente con Radio = 175 m y Lsc = 25 m	1.01	1.06
Puente con Radio = 175 m y Lsc = 30 m	2.10	2.00
Puente con Radio = 200 m y Lsc = 20 m	0.42	0.47
Puente con Radio = 200 m y Lsc = 25 m	1.01	1.04
Puente con Radio = 200 m y Lsc = 30 m	2.09	1.94

Las diferencias de los resultados de las deflexiones al comparar los valores obtenidos por los dos métodos son menores que el 8 %; esto tomando como base los resultados obtenidos por el método de elementos finitos.

En las figuras 7.1.1 a 7.1.3 aparecen graficadas las deflexiones de puentes para un mismo claro y variando los radios de curvatura entre 125, 150, 175 y 200 m, todos sujetos al tren de carga IMT 66.5.

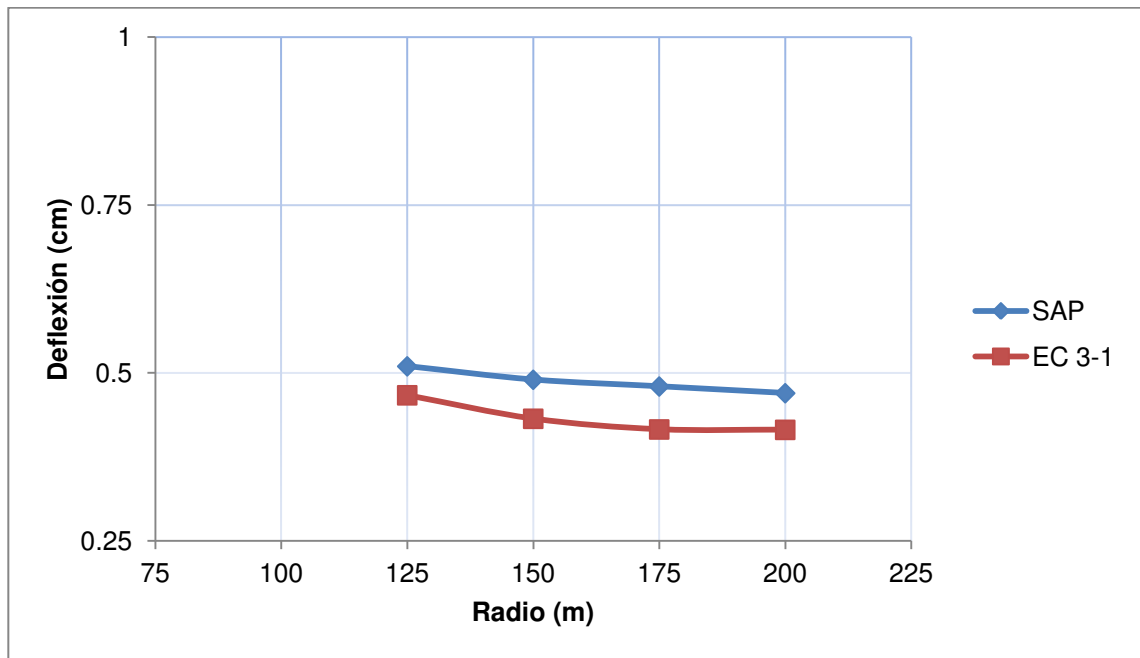


Figura 7.1.1 Deflexiones para puentes de 20 m de claro y con diferentes radios, calculados usando la ecuación propuesta 3-1, versus SAP 2000.



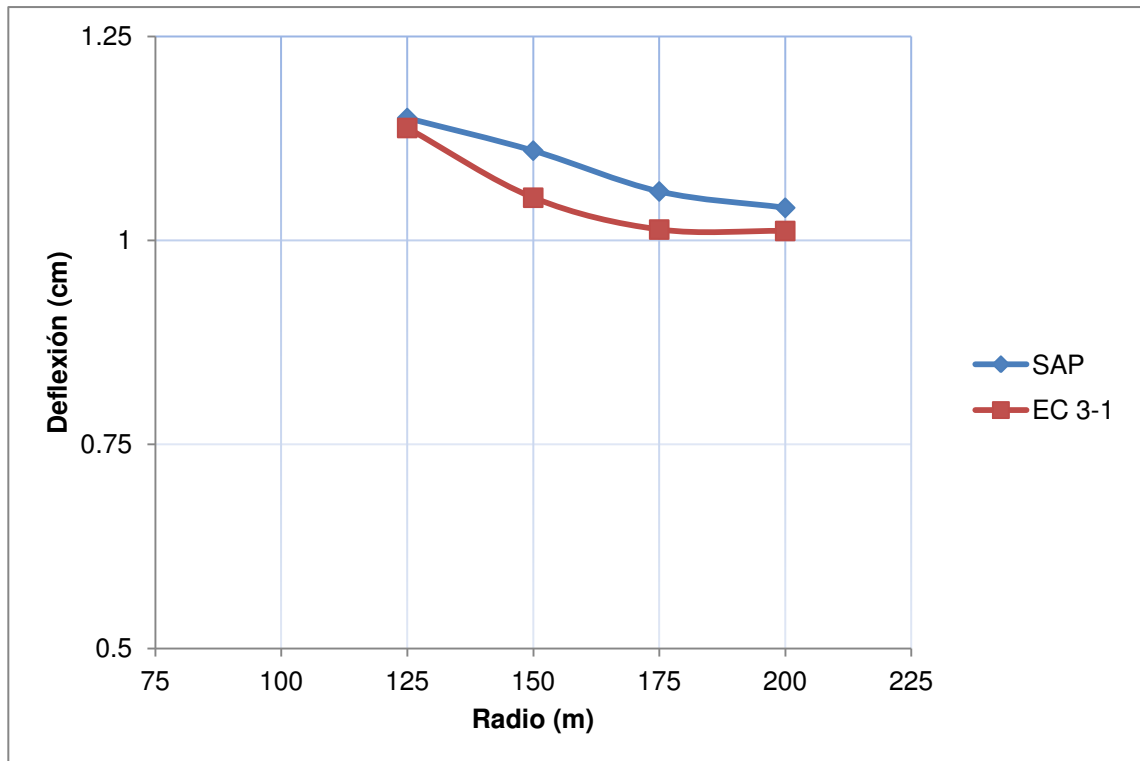


Figura 7.1.2 Deflexiones para puentes de 25 m de claro y con diferentes radios, calculadas usando la ecuación propuesta 3-1, versus SAP 2000.

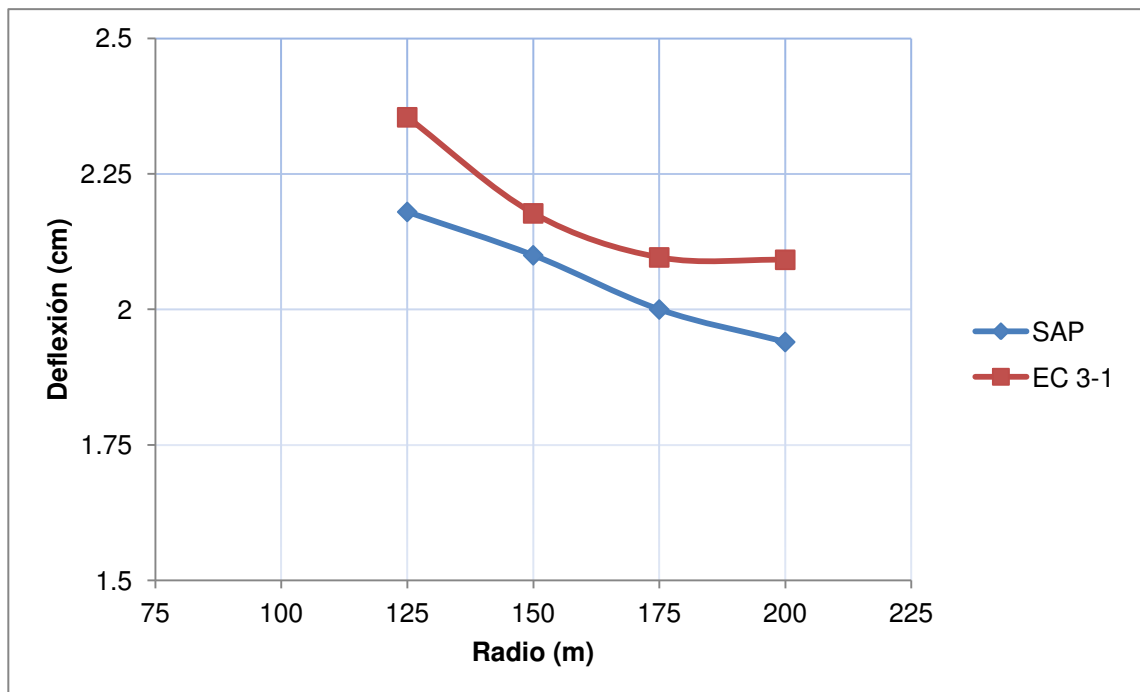


Figura 7.1.3 Deflexiones para puentes de 30 m de claro y con diferentes radios, calculadas usando la ecuación propuesta 3-1, versus SAP 2000.

En la figura 7.1.4 aparecen todas las deflexiones de las doce estructuras analizadas en la investigación analítica para los claros de 20, 25 y 30 m, variando los radios de curvatura entre 125, 150, 175 y 200 m, todos sujetos al tren de carga IMT 66.5.

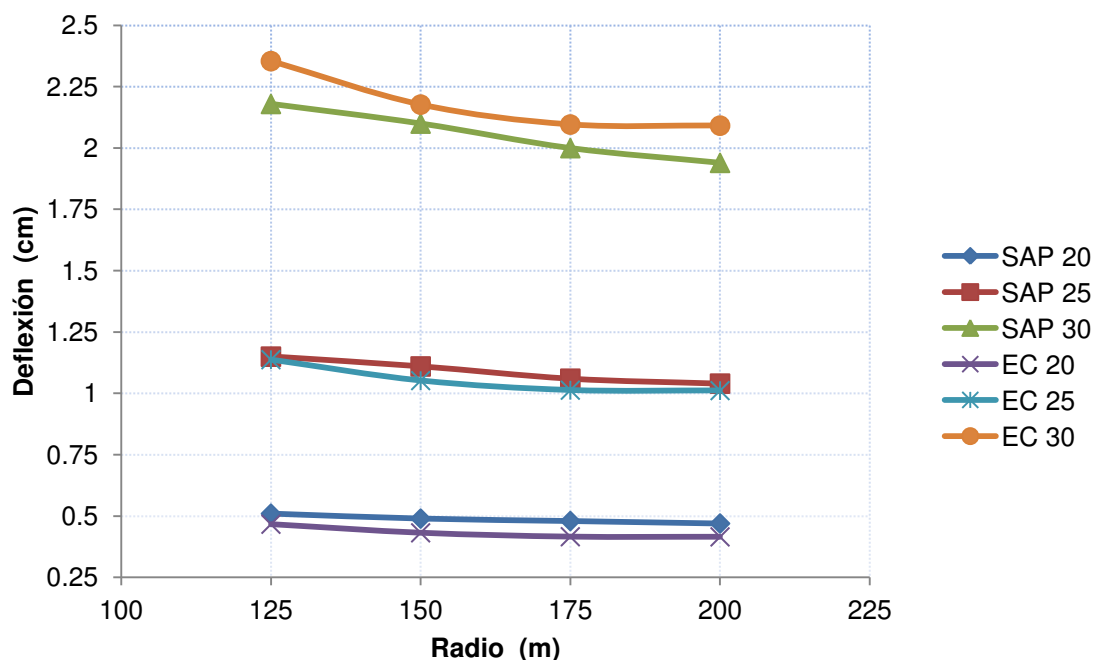


Figura 7.1.4 Deflexiones en puentes de distintos claros y radios utilizando la ecuación propuesta 3-1 versus, las obtenidas por el programa SAP 2000.

## 7.2 Comparación de los resultados de la ecuación propuesta, versus los de la simulación numérica y experimental del puente en estudio.

Para el puente en estudio se compararon los resultados del cálculo de la deflexión, obtenidos por la ecuación propuesta 3-1, los calculados utilizando el método del elemento finito SAP 2000 y el método aproximado del entramado plano, usando el programa STAAD Pro, con las lecturas obtenidas en el ensaye.

La carga del camión utilizado en el ensaye fue de 28,720 Kg, por lo que se utilizará ese valor para los cálculos de las deflexiones, usando la ecuación 3-1, SAP y STAAD.

Tabla 7.2 Comparación de las deflexiones al centro del claro, debidas al vehículo del ensaye, versus ecuación 3-1, SAP 2000 y STAAD Pro

Método utilizado	Intervalo medido LVDT	Método propuesto (ec 3-1)	Elemento finito SAP 2000	Método aproximado STAAD Pro
$\Delta$ en mm	3.95 a 3.35	8.87	3.73	8.55

Se aprecia, según los resultados de la tabla 7.2, que la ecuación propuesta 3-1 no es adecuada cuando se utilizan cargas distintas a las 66.5 toneladas del modelo IMT 66.5, como ocurre en el caso de estudio.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **Conclusiones**

1. La ecuación propuesta para la estimación de las deflexiones debidas a cargas vivas en puentes curvos de acero arrojó resultados adecuados para la condición de carga del camión IMT 66.5, de acuerdo con los modelos de análisis, empleando elementos finitos, tal como se aprecia en la Tabla 7.1.1 y en la Figura 7.1.4.
2. No fue así para cuando se utilizaron con el tren de carga del camión IMT 20.5, tal como quedó demostrado en la investigación experimental. Ver Tabla 7.2. Sin embargo, en el ensaye del puente se obtuvieron mediciones en el LVDT del intervalo de 3.95 a 3.35 mm, y el valor obtenido utilizando el elemento finito SAP 2000 fue de 3.73 mm, con lo que se demostró que el

método de solución utilizado en la simulación proporcionó resultados muy cercanos a la realidad.

### **Recomendaciones**

1. Se recomienda utilizar el método propuesto en esta tesis, para estimar las deflexiones debidas a carga viva, cuando se utilicen en el diseño de este tipo de estructuras los métodos aproximados de análisis de **Factores de Distribución de Carga** o el **Método del Entramado Plano**, ya que como se demostró en este trabajo, con la aplicación del método propuesto es posible obtener resultados más cercanos a los que presentará la estructura al someterla a las cargas vivas, esto tomando como base los resultados obtenidos utilizando el método más refinado de análisis MEF.

2. Se plantea la necesidad de llevar a cabo más investigación experimental que corrobore la ecuación propuesta, analizando puentes con cargas que representen el modelo de carga del IMT 66.5, ya que en la investigación actual se utilizó una carga más parecida al modelo de carga IMT 20.5.

3. Con relación a las lecturas de deformaciones tomadas en este ensaye en los patines y en las almas de las vigas del puente, se propone la realización de otros estudios donde se analicen los resultados de la investigación experimental con los obtenidos por la investigación analítica, utilizando el método del elemento finito. Para así aportar conocimiento acerca del comportamiento de las vigas de este tipo de estructuras y adicionalmente relacionar los esfuerzos en las vigas con las deflexiones y deformaciones que se midieron en estos ensayos, para una mejor comprensión del comportamiento de las vigas y de la estructura.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. *American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO, LRFD Bridge Design Specifications*, 5<sup>a</sup>. Edition, 2010.
2. *National Highway Institute, Analysis and Design of Skewed and Curved Steel Bridges with LRFD*, Publication No FHWA-NHI-10-086, February 2011.
3. *United States Steel from the National Steel Bridge Alliance, Highway Structures Design Handbook. "V-Load Analysis"*, Chicago, IL. 1984, Vol 1, Chapter 12.
4. A. Zureick and R. Naqib, February 1999. Horizontally Curved Steel I-Girders State-of-the-Art Analysis Methods, *Journal of Bridge Engineering*, Vol 4, No. 1.
5. *Report No NCHRP-563 Development of LRFD Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Bridges*, April 2006.

6. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Edición 2004, Norma N-PRY-CAR-6-01-007-4 Distribución de Cargas Vivas en Puentes.
7. Barrett Amy Elizabeth, May 2009, Study of the I-345 Bridge in Dallas Texas, Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science, University of Texas in Austin.
8. Petros P. Xanthakos, 1994, Theory and Design of Bridges, Ed John Wiley and Sons Inc.
9. Massonet M. Ch., Agosto de 1964, *Cálculo de Puentes de Vigas Múltiples con Diafragmas*, Dirección General de Proyectos y Laboratorios, Departamento Técnico, Sección de Especificaciones, Secretaria de Comunicaciones y Transportes, México D.F.
10. DePolo David S. and Linzell Daniel G., September 2008, Evaluation of Live-Load Lateral Flange Bending Distribution for a Horizontal Curved I-Girder Bridge, Journal of Bridge Engineering, Vol 13, No 5.
11. DePolo David S., March 2003, Field and Numerical Evaluation of Lateral Bending distribution factors for horizontally curved I-Girders, Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science, The Graduate School, Department of Civil and Environmental Engineering, The Pennsylvania State University.
12. Zureick A., Leon R.T., Burrell J. and Linzell D., 1998, Curved steel I girder bridges: Experimental and Analytical Studies, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta GA. Elsevier Engineering Structures.

13. McElwain Brett A. and Laman Jeffrey A., November 2000, Experimental Verification of Horizontally Curved I-Girder Bridge Behavior, Journal of Bridge Engineering, Vol. 5, No 4.
14. Krmarzick Dan P. and Hajjar Jerome F., Final Report 2006-40, Load Rating of Composite Steel Curved I-Girder Bridges through Load Testing with Heavy Trucks, Department of Civil Engineering, University of Minnesota, MN.
15. Davidson James S. and Yoo Chai H., February 2003, Effects of Distortion on the Strength of Curved I-Shaped Bridge Girders, Transportation Research Board.
16. Galambos Theodore V., Edited 1998, Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, Ed. John Wiley and Sons Inc. Chapter 9 Horizontally Curved Steel I-Girders pp 365-382, Fourth Edition,
17. *American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO and National Steel Bridge Alliance*, 2011, G 13.1 Guidelines for Steel Girder Bridge Analysis, 1<sup>st</sup> Edition.
18. Fiechtl Ann L., Fenves Gregory L. and Frank Karl H., November 1987, Approximate Analysis of Horizontally Curved Girder Bridges, Texas State Department of Highways and Public Transportation, Report FHWA/TX-91+360-2F.
19. Zureick A., Leon R.T., Burrell J. and Linzell D., January 1998, Curved Steel Bridges: Experimental and Analytical Studies, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Elsevier Engineering Structures.



20. Phoawanich Narin, White Donald W. and Zureick Abdul Hamid, July 1999, Evaluation of Moment-shear test specimens in Curved Steel Bridge Research Project, Georgia Institute of Technology.
21. Krzmarzick Dan P. and Hajjar Jerome F., October 2006, Load rating of Composite Steel Curved I-Girder Bridges through Load Testing with Heavy Trucks, Report MN/RC-2006-40.
22. Timoshenko Stephen P. and Goodier J. N., Theory of Elasticity, Ed. 2006, McGraw Hill International Editions, Third Edition.
23. Sotelino Elisa D., Liu Judy, Chung Wonseok and Phuvoravan Kitjapat, September 2004, Simplified Load Distribution Factor for use in LRFD Design, School of Civil Engineering, Purdue University, Indiana Department of Transportation and the U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Final Report FHWA/IN/JTRP-2004/20.
24. Zokaie T., Osterkamp T.A. and Imbsen R.A, 1991, Distribution of Wheel Loads on Highway Bridges, National Cooperative Highway Research Program, Washington D.C., Final Report NCHRP 12-26/1.
25. Linzell Daniel G., Laman Jeffrey A., Bell Bradley J. & Lobo John A., 1997, Field Studies of Moderately Curved Steel Bridges during Construction, Research In progress, Pennsylvania State University.
26. Hoffman Jerad James, 2013, Analytical and Field Investigation of Horizontally Curved Girder Bridges, Graduate Theses and Dissertations, Graduate College Iowa State University.

27. Morrill Jake L., 2016, Live-Load Test and Finite-Element Model Analysis of a Steel Girder Bridge, Graduate Theses and Dissertations, Graduate Studies, Utah State University.

28. *Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte*, Edición 2001, Norma N-PRY-CAR-6-01-003-1 *Cargas y Acciones en Puentes*.

## **APÉNDICE A**

### **PROCESO DE CALIBRACION DE LOS ADQUISIDORES.**

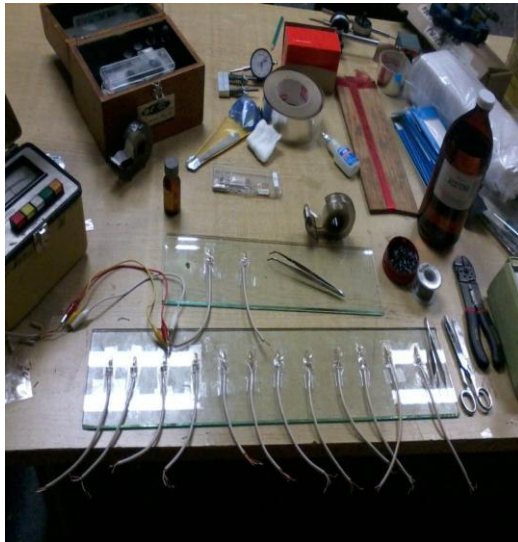


Figura A.1 Preparación de *strain gages* en laboratorio.



Figura A.2 Conexión de *strain gages* a tarjeta del adquisidor.

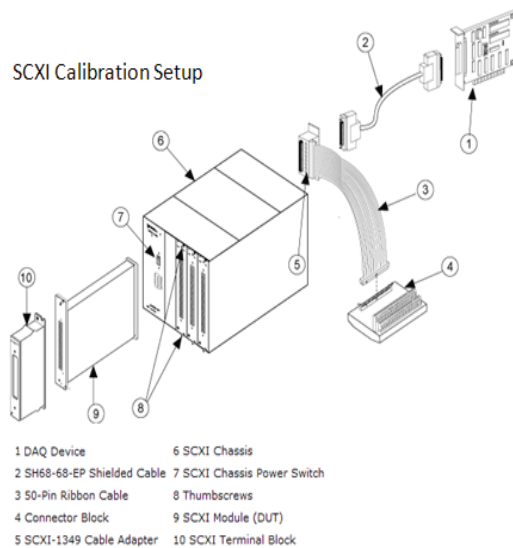


Figura A.3 Esquema de calibración del adquisidor.



Figura A.4 Toma de lecturas de inicio para la calibración.

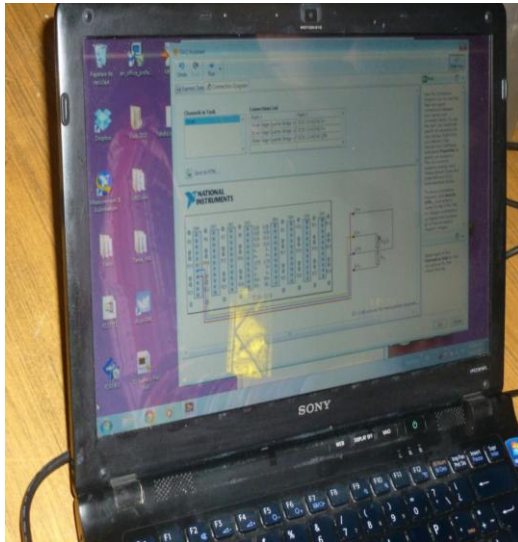


Figura A.5 Diagrama de las conexiones de los deformímetros.



Figura A.6 Calibración usando cilindro de concreto.

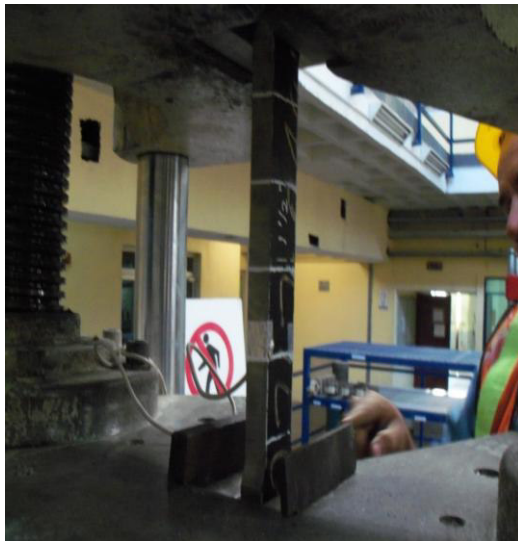


Figura A.7 Calibración con la probeta de acero.



Figura A.8 Calibración usando vigas de acero.





Figura A.9 Fijación del dispositivo para la aplicación de carga.

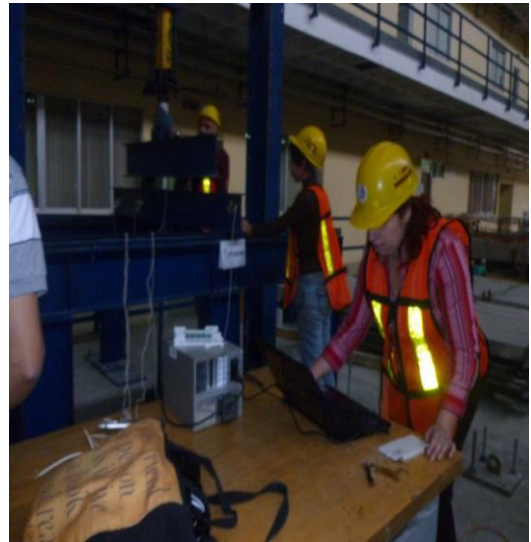


Figura A.10 Toma de lecturas durante la calibración usando vigas.



Figura A.11 Conexión del LVDT al adquisidor para su calibración.



Figura A.12 Verificación de niveles en marco para calibración del LVDT.

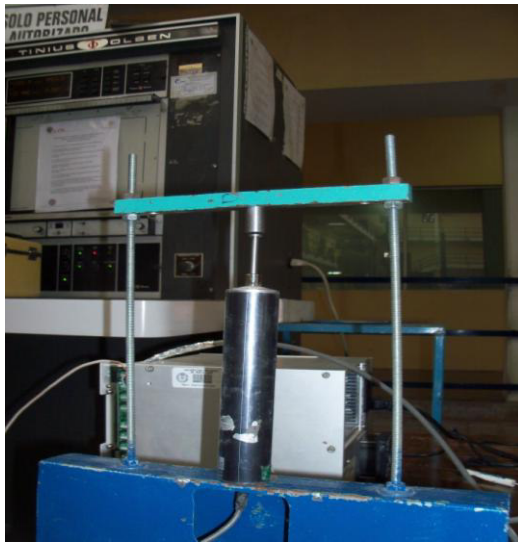


Figura A.13 Calibración del LVDT.



Figura A.14 Toma de lecturas durante la calibración del LVDT.



Figura A.15 Toma de lecturas en la maquina universal.

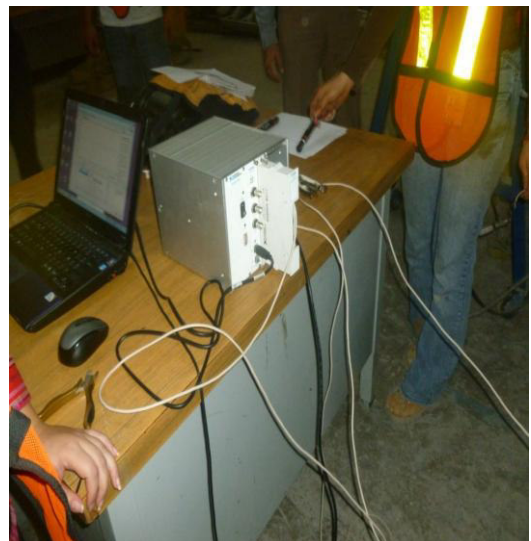


Figura A.16 Registro de lecturas de la maquina universal.

## **APÉNDICE B**

### **SECUENCIA DEL ENSAYE EN LA ESTRUCTURA EN ESTUDIO.**





Figura B.1 Revisión de conexiones en deformímetros.



Figura B.2 Remoción de los deformímetros ya preparados.



Figura B.3 Se remueve la pintura con un pequeño pulidor.



Figura B.4 Se remueve la pintura hasta llegar a la matriz.



Figura B.5 Remover pintura con solvente.



Figura B.6 Se coloca el adhesivo.



Figura B.7 Se fija el deformímetro en la viga.



Figura B.8 Se coloca cinta de protección y se fijan los cables.



Figura B.9 Fijación de cables del deformímetro.

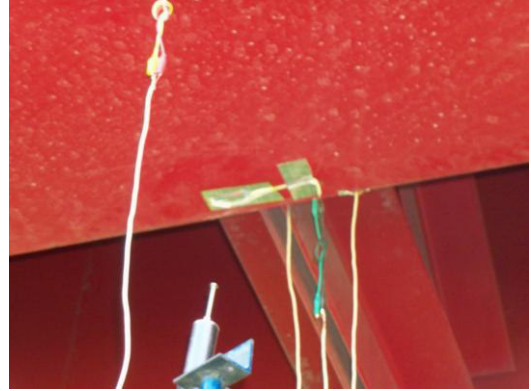


Figura B.10 Fijación de deformímetro y colocación de LVDT.



Figura B.11 Deformímetros y LVDT al centro de la viga V-20.



Figura B.12 Instalación de LVDT en viga V-20.





Figura B.13 Conexión de deformímetros y LVDT al adquisidor.



Figura B.14 Trazo de trayectoria a seguir por el camión.

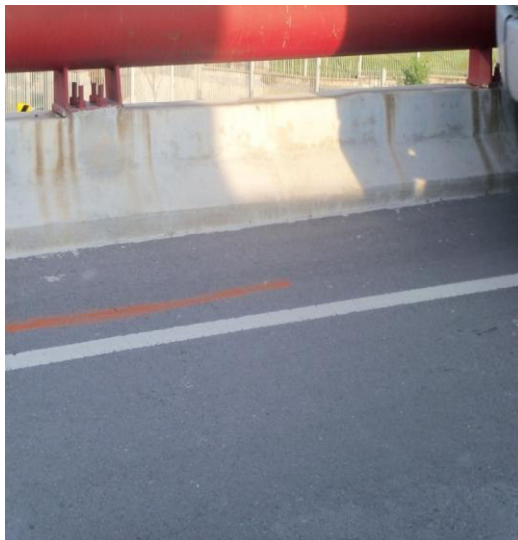


Figura B.15 Trayectoria a seguir por el camión durante el ensaye.



Figura B.16 Toma de lecturas sin carga en el puente.



Figura B.17 Acomodar el camión para seguir una trayectoria.



Figura B.18 Camión siguiendo la trayectoria indicada.

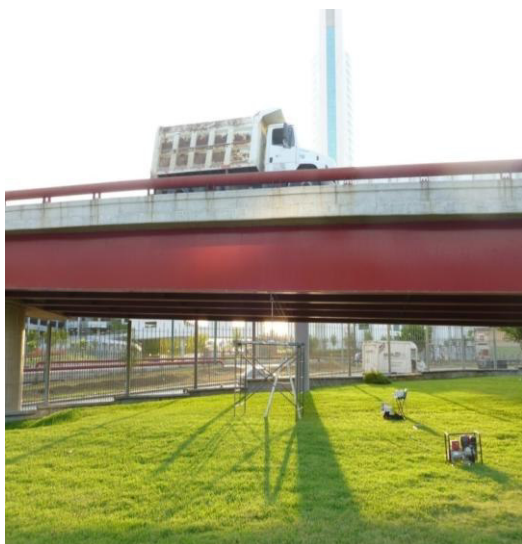


Figura B.19 Toma de lecturas durante el ensaye.

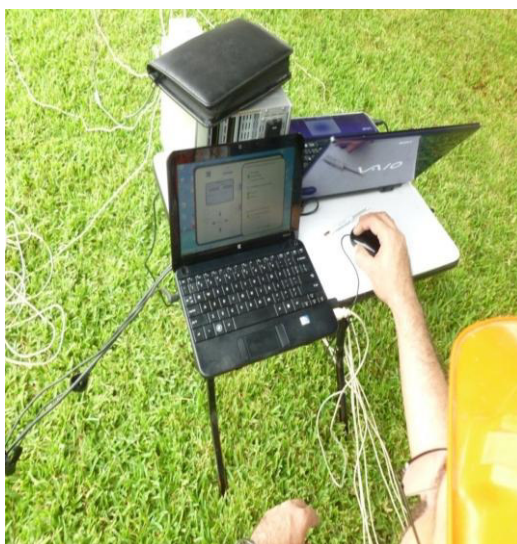


Figura B.20 Toma de lecturas con ambos adquirentes.

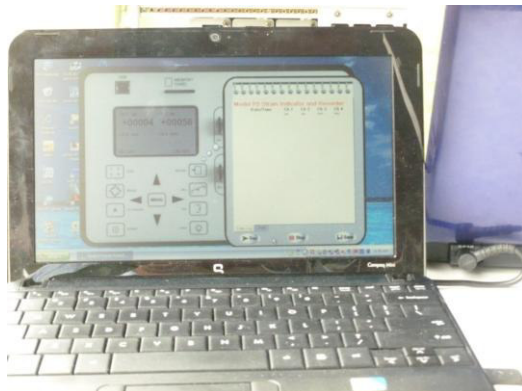


Figura B.21 Toma de lecturas con  
adquisidor VISHAY Modelo P-3.

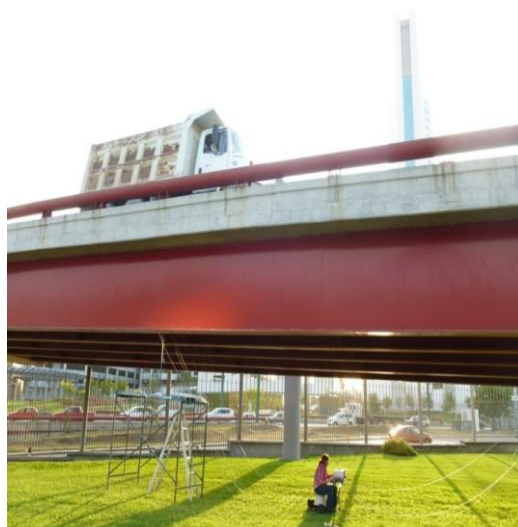


Figura B.22 Tomando lecturas  
durante el ensaye.

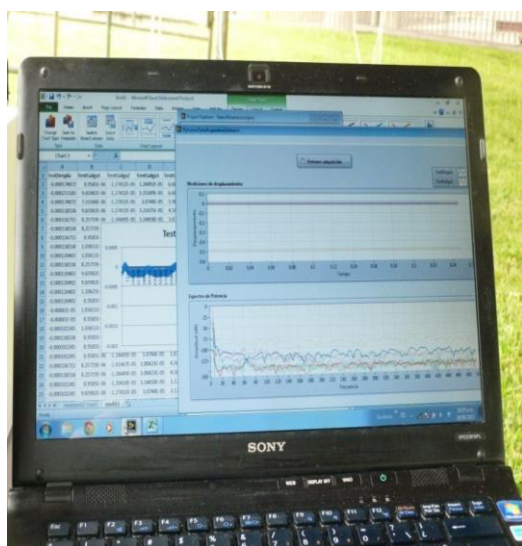


Figura B.23 Toma de lecturas con  
adquisidor SCXI 1600.

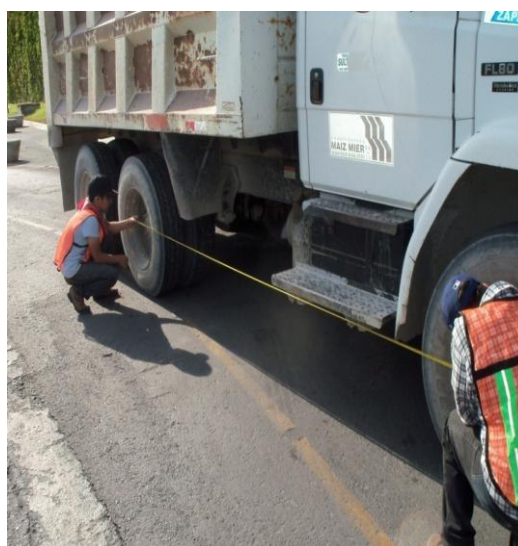


Figura B.24 Tomando las medidas  
del camión usado en la prueba.





Figura B.25 Obtención de datos del camión del ensaye.



Figura B.26 Bascula pública para el pesaje del camión del ensaye.



Figura B.27 Pesaje del camión usado en el ensaye.



Figura B.28 Pesaje del eje delantero del camión del ensaye.

## **APÉNDICE C**

### **RESULTADOS DE LAS PRUEBAS A LA ESTRUCTURA EN ESTUDIO.**

En las siguientes figuras, aparecen graficados los resultados de las lecturas tomadas durante el ensaye, ya filtradas para eliminar las señales de ruido por corrientes parásitas y otras interferencias. Se muestran los resultados de los 6 ensayes, para las vigas V-19 y V-20.



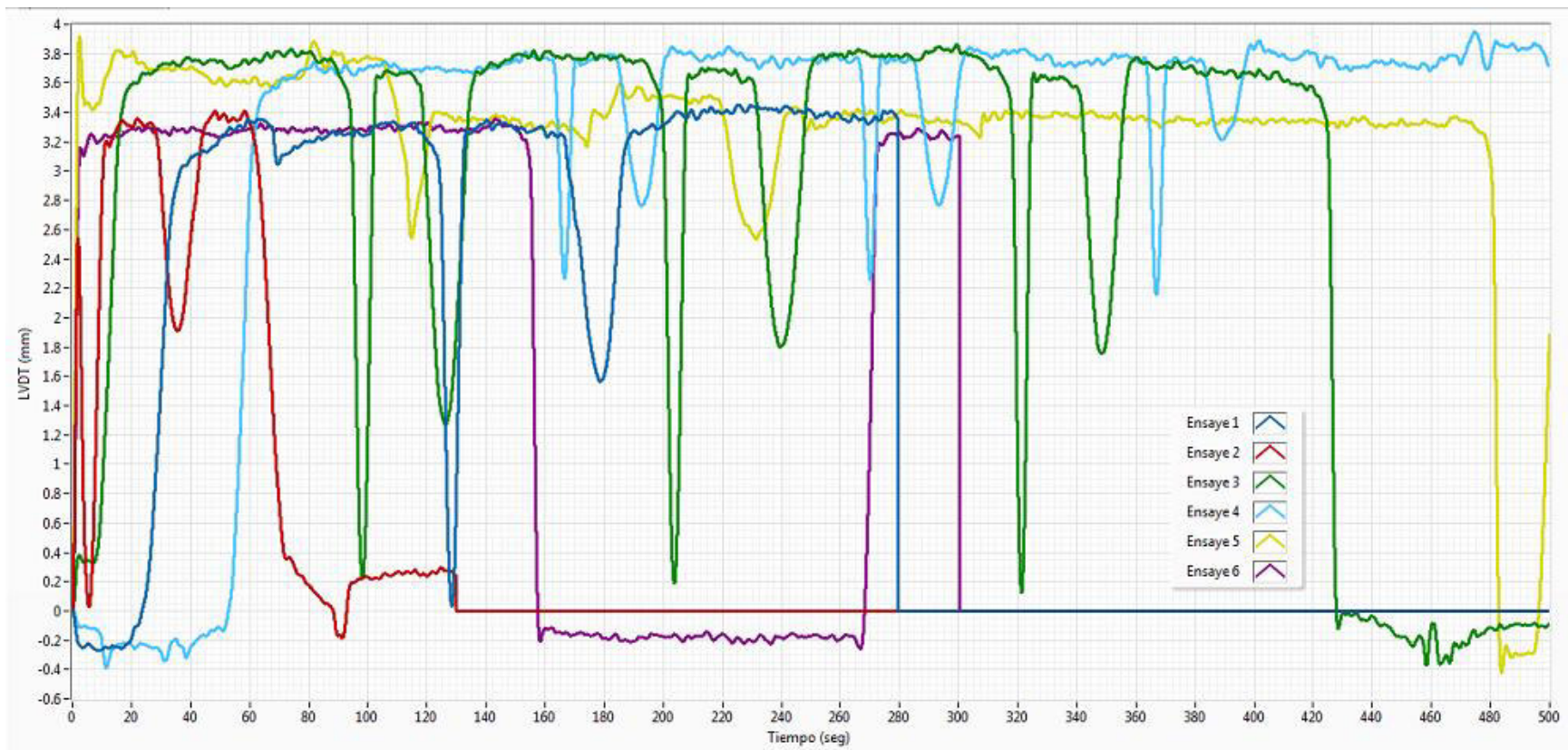


Figura C.1 Deflexión al centro del claro-medida, en la viga exterior V-20.

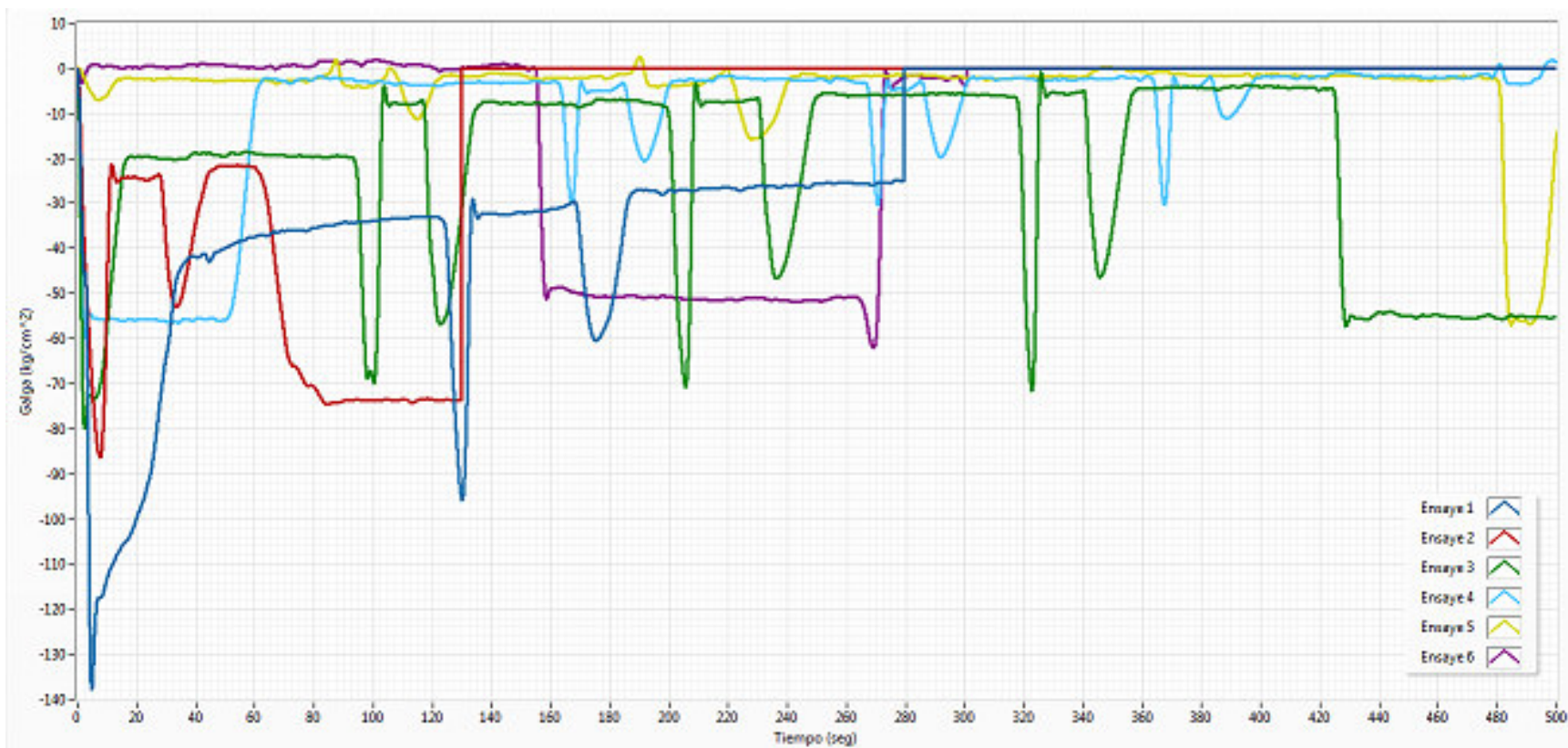


Figura C.2 Resultados de la galga No 2, colocada sobre el apoyo en la parte inferior del alma de la viga exterior V-20.



Figura C.3 Resultados de la galga No 3, colocada sobre el apoyo en la mitad de la altura del alma de la viga exterior V-20.



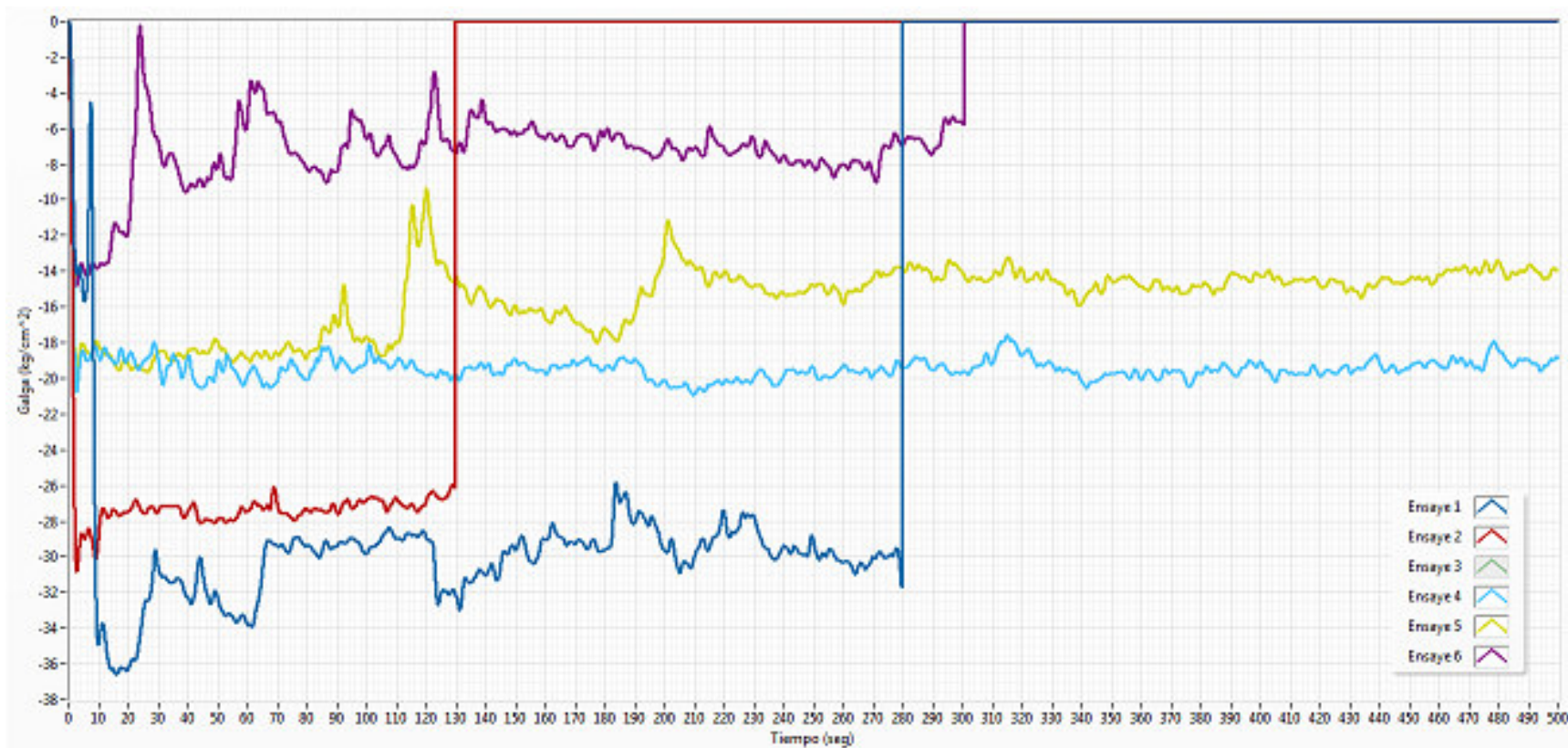


Figura C.4 Resultados de la galga No 7, colocada a un lado del diafragma, a la mitad de la altura del alma de la viga exterior V-20.

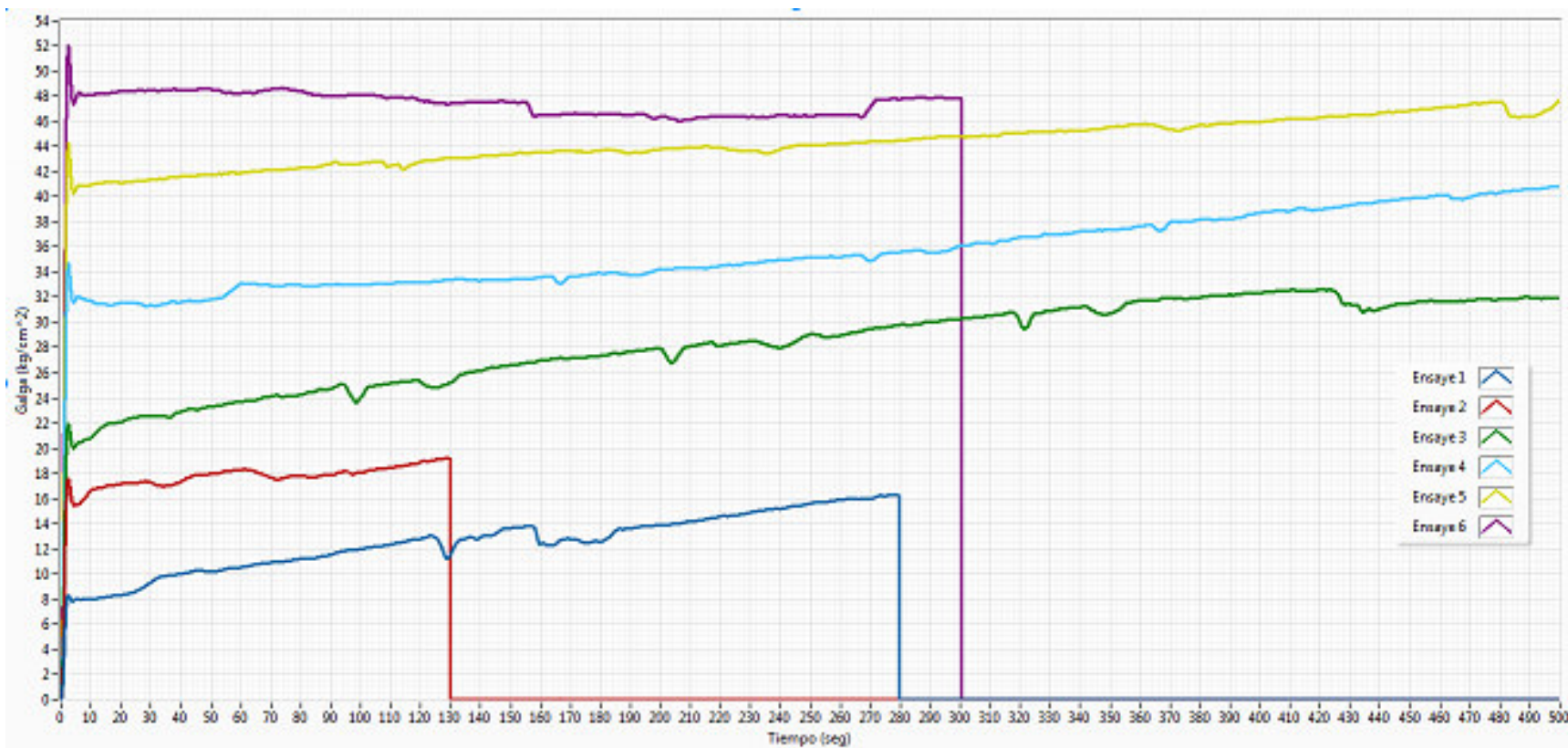


Figura C.5 Resultados de la galga No 11, colocada al centro del claro y a la mitad de la altura del alma de la viga exterior V-20.

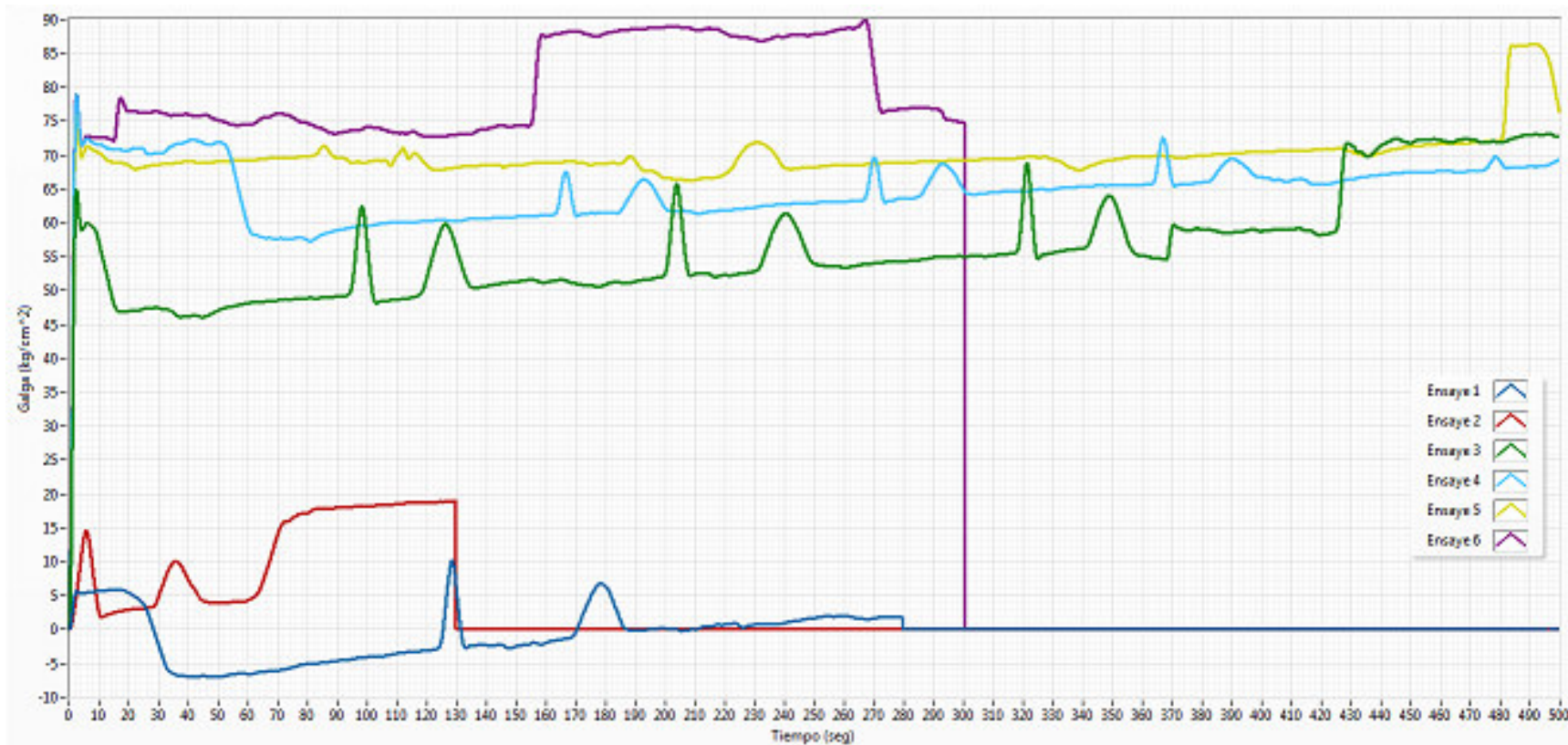


Figura C.6 Resultados de la galga No 14, colocada al centro del claro, en el patin de la viga exterior V-20, lado exterior de la curva



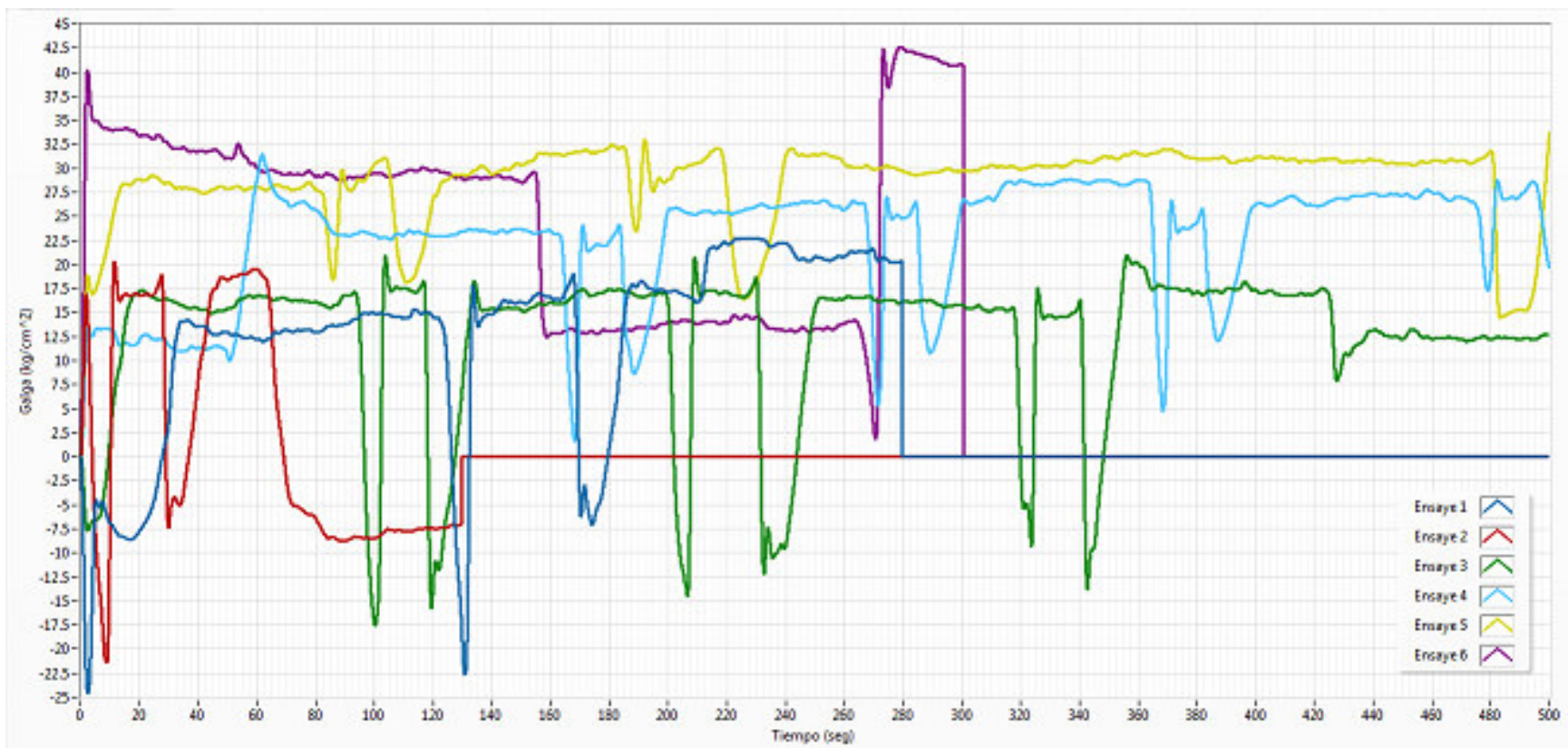


Figura C.7 Resultados de la garga No 1, colocada sobre el apoyo en la parte inferior del alma de la viga interior V-19.

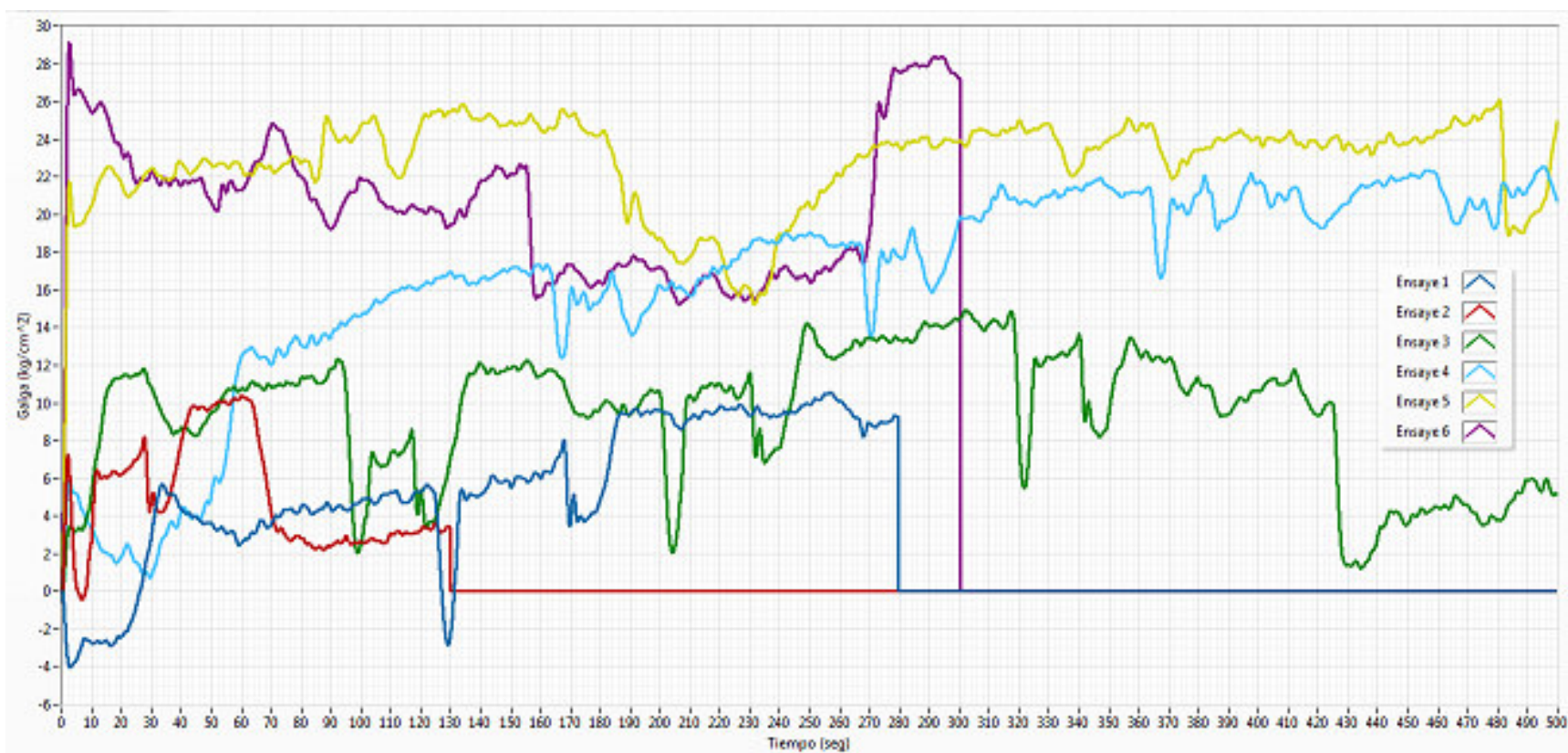


Figura C.8 Resultados de la galga No 4, colocada sobre el apoyo en la mitad de la altura del alma de la viga interior V-19.



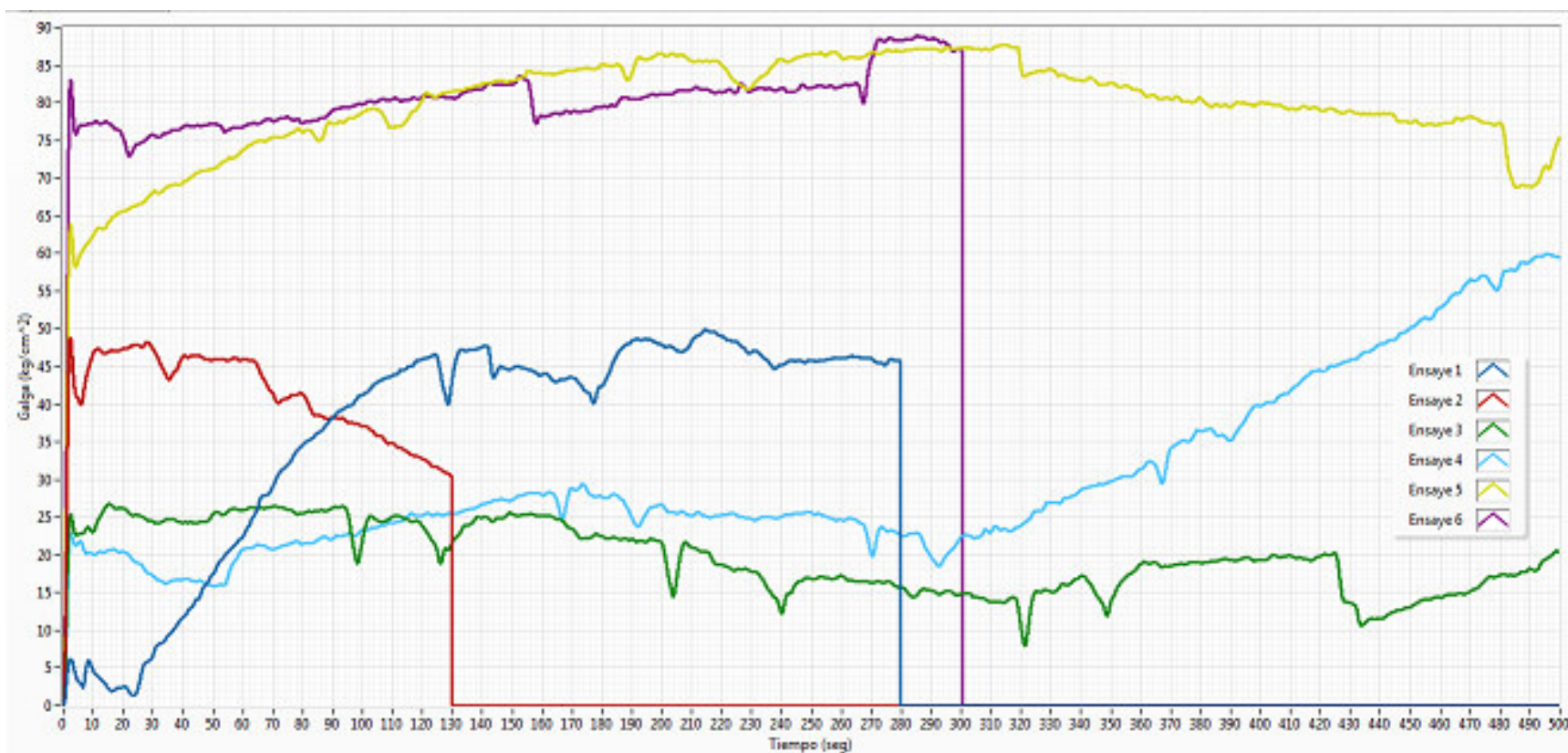


Figura C.9 Resultados de la galga No 5, colocada al centro del claro, en la mitad de la altura del alma de la viga interior V-19.

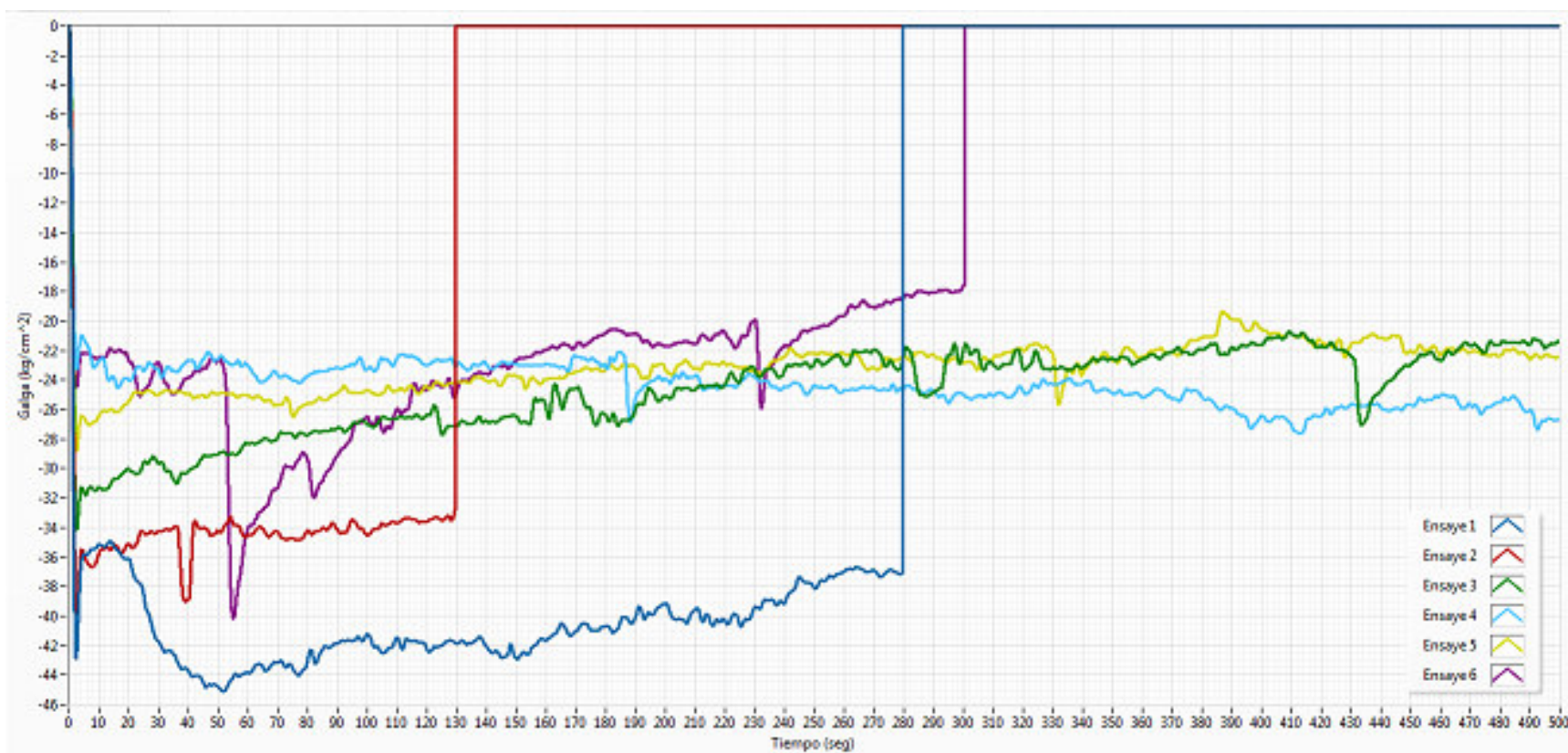


Figura C.10 Resultados de la galga No 12, colocada al centro del claro, en la parte inferior del alma de la viga interior V-19.

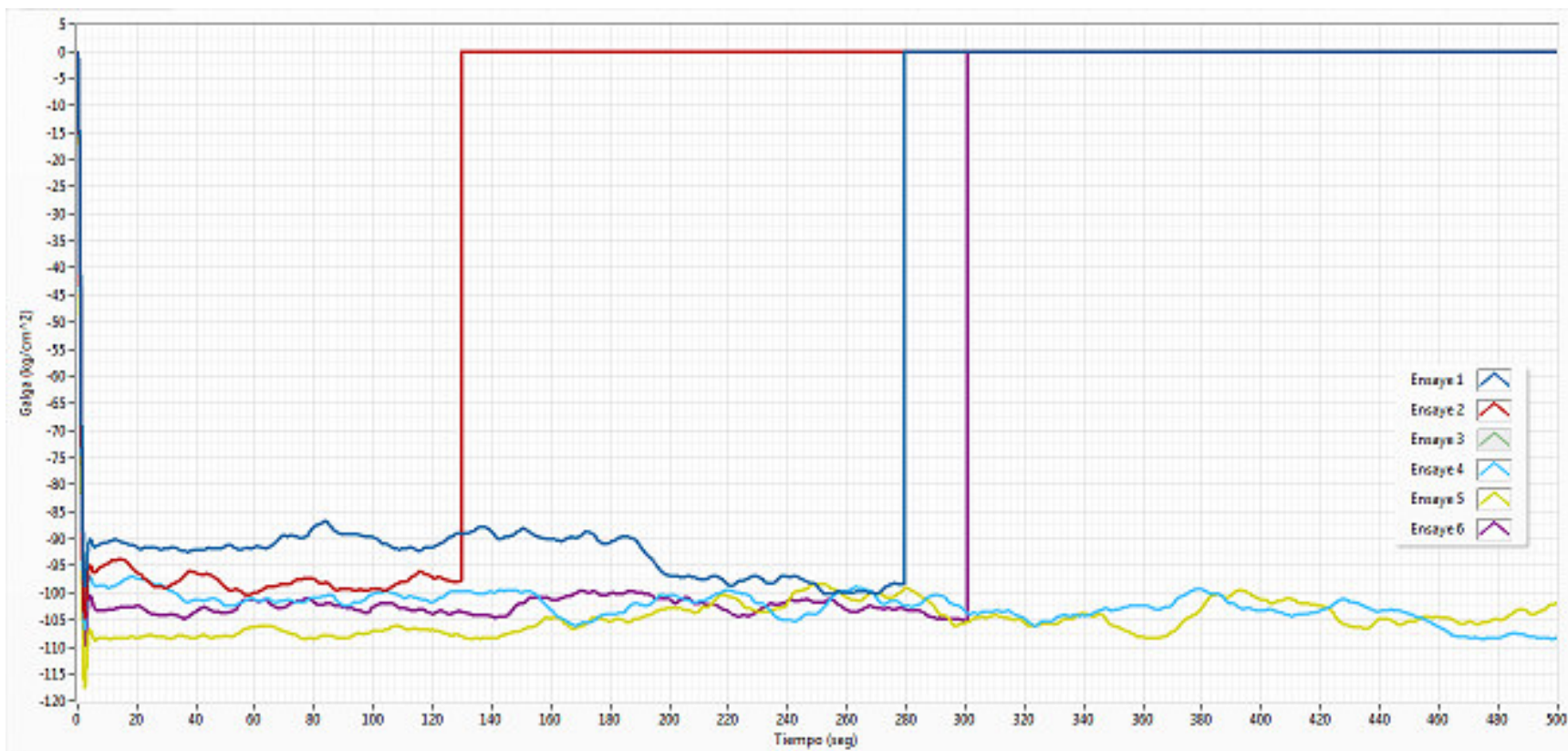


Figura C.11 Resultados de la galga No 10, colocada al centro del claro, en el patin de la viga interior V-19, lado interior de la curva